B20396F

Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 4.2012



WAS WIR SEHEN UND MESSEN KÖNNEN, MACHT 4 PROZENT DES UNIVERSUMS AUS. 96 PROZENT LIEGEN IM DUNKELN.

KOSMOLOGIE

Die dunklen Seiten des Universums

BIOTECHNOLOGIE
Kulturkampf um die Gentechnik

MEDIZIN
Knochengerüst mit Ecken und Kanten

MATERIALWISSENSCHAFTEN
Haut mit hohem Rostschutzfaktor

ORNITHOLOGIE
Vögel, die auf Städte fliegen

Weniger Neben. Mehr Wirkung.

Mehr Lebensqualität durch Personalisierte Medizin von Roche.

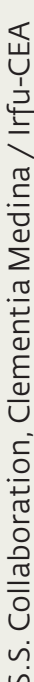
Jeder Mensch ist anders – auch genetisch. Deshalb setzen wir auf Personalisierte Medizin: Unsere Bereiche Pharma und Diagnostics arbeiten gemeinsam an Tests und Wirkstoffen, um Therapien besser auf die Bedürfnisse von Patienten abzustimmen.

Unsere Innovationen helfen Millionen Menschen, indem sie Leid lindern und Lebensqualität verbessern. Wir geben Hoffnung.

www.roche.de



Innovation für die Gesundheit

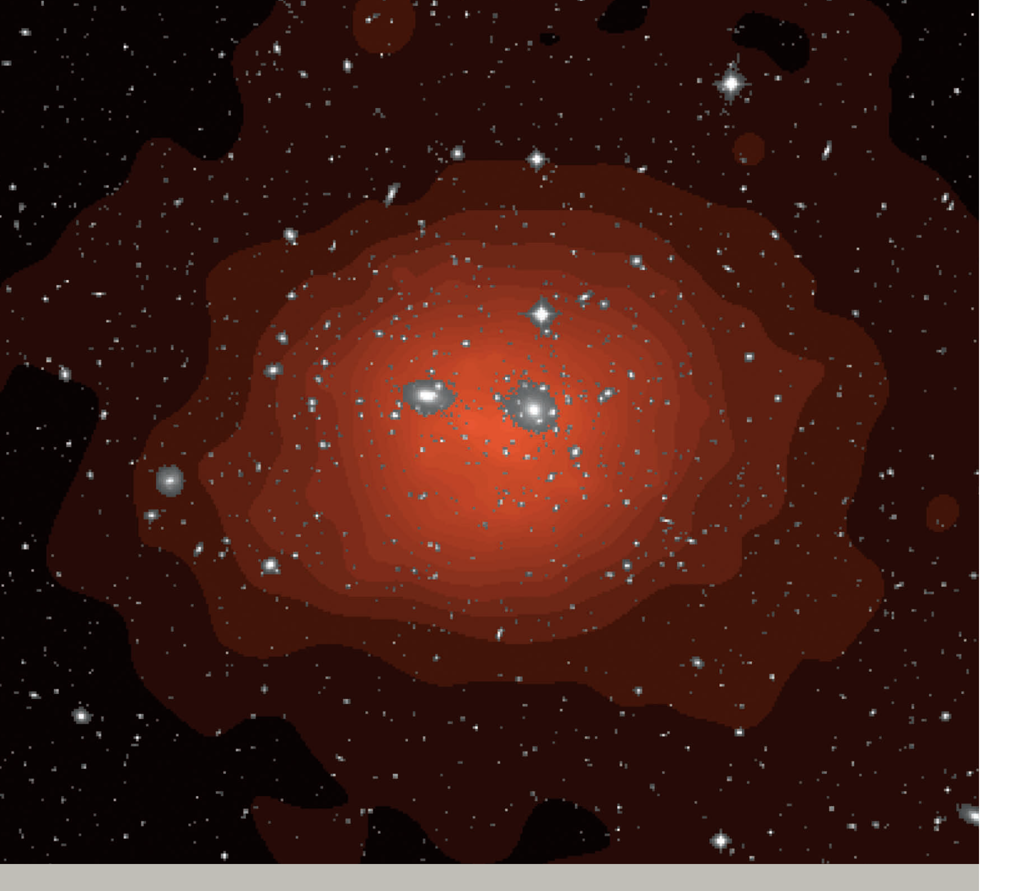

Foto: H.E.S.S. Collaboration, Clementia Medina / Irfu-CEA

Glanzlicht unterm Sternenzelt

Die Erde ist einem ständigen Bombardement ausgesetzt. Andauernd geht irgendwo in den Weiten des Weltalls ein Stern hoch oder katapultiert ein schwarzes Loch gigantische Gaswolken aus dem Herzen einer fernen Milchstraße. Von diesen martialischen Ereignissen künden Gammastrahlen, die geradewegs durch das Universum laufen und schließlich auf die Erdatmosphäre treffen. Dort ist erst mal Endstation – zum Glück für das Leben, denn die Energiedosis wäre auf Dauer tödlich. Aber das Gammalicht löst sich keineswegs in Nichts auf – zum Glück für die Astronomen, denn so können sie die kosmischen Botschafter untersuchen. Die Strahlung vergeht nicht spurlos, sondern in einer Partikelkaskade hoch über dem Boden. Dabei entstehen jede Menge Elementarteilchen. Sie erzeugen Tscherenkow-Licht – blaue Blitze, die lediglich eine milliardstel Sekunde dauern und dem Auge verborgen bleiben.

Um dieses himmlische Leuchten aufzuzeichnen, haben Forscher vor ein paar Jahren die vier H.E.S.S.-Teleskope im namibischen Khomas-Hochland gebaut – und das Quartett nun in ein Quintett verwandelt. H.E.S.S. II heißt die neue Schüssel, die sich auf unserem Bild im Mondschein als stählerne Pyramide in den Nachthimmel reckt. Mit einem Durchmesser von 28 Metern entspricht ihre Fläche der von zwei Tennisplätzen. Nicht weniger als 580 Tonnen wiegt der Koloss, allein drei Tonnen sein Kameraauge. Die fünf Späher des H*igh* E*nergy* S*tereoscopic* S*ystem* zeichnen die blauen Blitze nach allen Regeln der astronomischen Beobachtungskunst auf. Die Spurensicherung in den Daten führt dann gleichsam zum Tatort, zur Quelle der Strahlung. Als Detektive betätigen sich auch die Astronomen am Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik, das maßgeblich an Entwicklung und Design von H.E.S.S. II beteiligt war und die Aufbauarbeiten koordiniert hat. So werden wir die kosmischen Teilchenschleudern wie Supernovae oder schwarze Löcher bald noch besser verstehen.

Inhalt



18 KOSMOLOGIE

Die dunklen Seiten des Universums

ZUM TITEL: „Die im Dunkeln sieht man nicht." Diese Zeile aus der „Moritat von Mackie Messer" in Brechts *Dreigroschenoper* hat durch die moderne Kosmologie unerwartete Aktualität erfahren: Das Universum liegt weitgehend in Finsternis. Das heißt nicht, dass der Nachthimmel schwarz ist. Vielmehr stecken 96 Prozent der kosmischen Gesamtmasse in der Dunklen Energie und der Dunklen Materie – zwei bisher völlig unbekannte Stoffe.



PERSPEKTIVEN

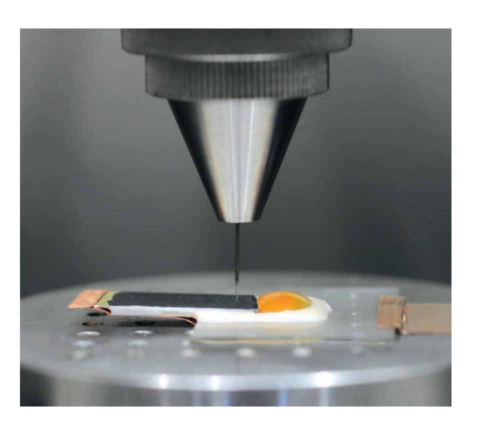
ZUR SACHE

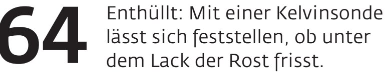
Titelfoto: Klaus Weyer / www.watchgear.de; Fotos dieser Seite: MPI für extraterrestrische Physik (links), Kai Weinsziehr (kleines Bild)

TECHMAX

Die Natur als geniale Apotheke – warum Chemiker kompli-zierte Naturstoffe nachbauen











FOKUS KOSMOLOGIE

SPEKTRUM

BIOLOGIE & MEDIZIN

MATERIAL & TECHNIK

UMWELT & KLIMA

KULTUR & GESELLSCHAFT

RUBRIKEN

Fotos: Frank Vinken (links), MPI für Ornithologie (Mitte), Fnoxx (rechts)

Wir müssen ein weltweites Netz knüpfen



In seinem Buch „Die Welt ist flach" beschreibt Thomas L. Friedman, Pulitzer-Preisträger und Kolumnist der New York Times, wie Globalisierung und elektronische Netze unser Leben radikal verändern: Amerikanische Wirtschaftsprüfer und Steuerberater lassen Steuererklärungen anonymisiert in Indien ausführen, Radiologen von US-Krankenhäusern delegieren die Auswertung von CT-Scans an Ärzte – in Indien. Das Land ist inzwischen einer der größten IT-Dienstleister der Welt und wird – analog zu China, das gerne als „Werkbank der Welt" bezeichnet wird – das „Backoffice der Welt" genannt. Computer, die schnelle Datenübertragung via Glasfaserkabel und Workflow-Softwarelösungen haben dazu geführt, dass wir immer besser im globalen Rahmen kooperieren und konkurrieren. Nicht nur wirtschaftliche, sondern auch wissenschaftliche Aktivitäten zeigen heute ein beschleunigtes, komplexeres und geografisch breiteres Muster von internationalem Austausch und Kooperation.

Wie sollen wir auf diese Dynamik reagieren? Die Entscheidung von Unternehmen für einen Standort hängt von der Verfügbarkeit lokaler Fähigkeiten, der Infrastruktur und dem Zugang zu neuem Wissen ab. Um als Standort attraktiv zu bleiben, muss Deutschland deshalb zu einer ersten Adresse für die besten Forscherinnen, Forscher und Studierenden aus aller Welt werden. Schon heute sind qualifizierte MINT-Kräfte in Deutschland Mangelware – laut Handelsblatt fehlen derzeit rund 150 000 Akademiker nur in den Fächern Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik. Bis zum Jahr 2030 wird sich diese Situation aufgrund des demografischen Wandels weiter verschärfen – nach einem Zwischenhoch wird die Absolventenkurve von 2020 an wieder abflachen. Gleichzeitig steigt die Mobilität international Studierender. So verlassen jährlich mehr als eine halbe Million Inderinnen und Inder ihr Land für ein Studium im Ausland. Weil in Indien massenhaft Studienplätze fehlen, hat die Regierung erst vor Kurzem ein Gesetz beschlossen, das den Zugang von Hochschulen aus dem Ausland auf den Subkontinent regeln und erleichtern soll. Auch andere Länder werben intensiv um ausländische Bildungsträger. Im Mittleren Osten investieren Scheichtümer Milliarden, um ausländische Universitäten anzulocken. So hat die Harvard Medical School 2006 in Dubai das Harvard Medical School Dubai Center aufgebaut, um die Zusammenarbeit in der medizinischen Forschung und Ausbildung voranzutreiben. Im vergangenen Jahr verkündete Harvard, dass es mit Mitteln der Qatar Foundation eine Graduiertenschule für Rechtswissenschaften in Doha aufbauen wird.

2010 hatte Yale als erste Ivy-League-Universität in Übersee einen Hochschulcampus zusammen mit der National University of Singapore (NUS) etabliert. Yale-NUS soll eine neue Ära in der internationalen Bildung einläuten. Die New York University (NYU) ist seit 2010 in Abu Dhabi. 9000 Studenten haben sich in der ersten Ausschreibungsrunde auf die knapp 200 Plätze beworben. Nun will die NYU nach Shanghai expandieren. Man möchte, so ihr Präsident, als weltweit erste globale Universität einen entscheidenden Schritt tun, um mit Harvard, Yale und Princeton zu konkurrieren. Im Wettbewerb um die besten Köpfe verschaffen sich amerikanische Universitäten eine günstige Ausgangsposition. Deutsche Hochschulen sind erst spät in den Bildungsexport eingestiegen – und ihnen fehlt, trotz Exzellenzinitiative, der Glanz. Nach wie vor schafft es keine deutsche Universität unter die Top Ten im Shanghai-Ranking.

Im Wettbewerb um Talente

Foto: Axel Griesch

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat diese Problematik erkannt und die Wissenschaftsorganisationen aufgefordert, „spezifische Angebote an den wissenschaftlichen Nachwuchs aus dem Ausland zu richten, um in Hinblick auf das angestrebte Wachstum an Forschungsaktivitäten in hinreichendem Umfange talentierten und gut qualifizierten Nachwuchs zu gewinnen". Die Max-Planck-Gesellschaft hat bereits im Jahr 2000 gemeinsam mit den deutschen Hochschulen mit dem Aufbau von Graduiertenschulen begonnen. An den mittlerweile 61 International Max Planck Research Schools lernen und forschen rund 3000 junge Doktorandinnen und Doktoranden, von denen die Hälfte aus dem Ausland stammt – aus mehr als 100 verschiedenen Herkunftsländern. Viele von ihnen würden nach ihrem Abschluss gerne für einige Jahre in Deutschland arbeiten. Gut ausgebildet, leistungsorientiert und in mehreren Kulturen zu Hause, erschließt sich hier ein wertvolles Mitarbeiterpotenzial. Die Einführung der Blue Card war deshalb ein wichtiger Schritt, denn bisher geht ein Großteil der ausländischen Studierenden dem deutschen Arbeitsmarkt verloren.

Aber es geht um mehr als Nachwuchstalente – es geht um globale Wertschöpfungsketten. Mehr als 90 Prozent des weltweiten Wissens entsteht außerhalb Deutschlands. Um an den weltweiten Wissensflüssen teilzuhaben, muss Forschung international aufgestellt sein. Nehmen wir das Beispiel der RNA-Interferenz: 1998 entdeckten Forscher in den USA, dass Gene über kurze RNA-Schnipsel stillgelegt werden können. Thomas Tuschl gelang es wenige Jahre später am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, diesen Mechanismus auch in Zellen von Säugetieren zur Anwendung zu bringen. Die entsprechenden Patente liegen in Händen der Max-Planck-Gesellschaft und des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Die wirtschaftliche Weiterentwicklung dieser Methode hin zu einem therapeutischen Einsatz wird derzeit durch die US-amerikanische Firma Alnylam Pharmaceuticals betrieben. Oder: Axel Ullrich vom Max-Planck-Institut für Biochemie hat gezeigt, wie gezielt in den komplexen Mechanismus der Tumorentwicklung eingegriffen werden kann. In der von ihm gegründeten Firma Sugen wurden diese grundlegenden Erkenntnisse für eine medizinische Anwendung weiterentwickelt. Nach Übernahme durch Pharmacia und später Pfizer kam das entsprechende Medikament schließlich 2006 auf den Markt.

Teilhabe an globalen Wissensflüssen

Für die Max-Planck-Gesellschaft ist internationale Zusammenarbeit seit jeher ein wesentlicher Faktor zur Erfüllung ihrer eigenen Mission. Komplexe Probleme können nur unter Einbeziehung verschiedener Experten gelöst werden. So sind Max-Planck-Institute an über 5000 Projekten mit mehr als 6000 Forschungspartnern in 120 Ländern dieser Welt beteiligt. Jede zweite Publikation aus der Max-Planck-Gesellschaft entsteht in internationaler Zusammenarbeit. Keine andere europäische Forschungsorganisation ist derart international vernetzt. Um sich Zugang zur internationalen Spitzenforschung im Ausland zu verschaffen, hat die Max-Planck-Gesellschaft – amerikanischen Eliteuniversitäten vergleichbar – ihre Präsenz in wichtigen Zielländern in den vergangenen Jahren verstärkt mit dem Ziel, Innovationspotenziale im Ausland abzuschöpfen und Talente frühzeitig zu entdecken und zu binden.

Indien beispielsweise ist ein Schlüsselstandort für Computerwissenschaften. Deshalb haben wir 2010 mit Unterstützung des BMBF und des indischen Department of Science and Technology ein Max Planck Center in Neu-Delhi gegründet als Plattform für die Zusammenarbeit des Max-Planck-Instituts für Informatik in Saarbrücken mit dem Indian Institute of Technology. Aktuell entsteht ein Max Planck Center auf dem Gebiet der Neurowissenschaften in Kooperation mit der Hebrew University in Jerusalem. Des Weiteren gibt es Max Planck Center auf dem Gebiet der Materialforschung in Kooperation mit der University of British Columbia in Vancouver, Kanada, mit dem Riken Institute in Japan oder der renommierten Princeton University in den USA – um hier nur fünf der derzeit 14 Max Planck Center in Europa, Nordamerika und Asien zu nennen.

Darüber hinaus zählt die Gesellschaft inzwischen fünf Auslandsinstitute in Italien, Luxemburg, den Niederlanden sowie in den USA. Hier hat der Bundesstaat Florida zuletzt den Aufbau des Max Planck Florida Institute mit 186 Millionen US-Dollar gefördert. Die Max-Planck-Gesellschaft hat auf diese Weise Zugang zu dem nach wie vor weltweit führenden US-amerikanischen Wissenschaftsmarkt erhalten.

Niemand kann es sich heute noch leisten, auf eine Internationalisierungsstrategie zu verzichten. Richard Edelstein, Experte für internationale Bildung an der University of California in Berkeley, geht davon aus, dass diese in den kommenden fünf, zehn oder 50 Jahren signifikante Auswirkungen haben wird. Die Max-Planck-Gesellschaft ist international gut aufgestellt – und wirbt als Markenbotschafter zugleich für den Standort Deutschland im Ausland.

Peter Gruss,
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft

Max-Planck-Institut in Florida eröffnet



Höhepunkt der Zeremonie: Mit dem Zerschneiden des Bandes wurde das neue Gebäude offiziell eingeweiht.

Im Rahmen eines Festakts wurde das Max Planck Florida Institute for Neuroscience (MPFI) am 6. Dezember 2012 eröffnet. Es ist das erste Institut der Max-Planck-Gesellschaft in den USA. An der Eröffnungszeremonie nahmen unter anderen teil Jeff Atwater, Finanzchef des US-Bundesstaates Florida, Cornelia Quennet-Thielen, Staatssekretärin des deutschen Bundesministeriums für Bildung und Forschung, sowie Jeb Bush, ehemaliger Gouverneur von Florida. Der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft Peter Gruss hob die Vorteile des Standorts hervor: „In Jupiter finden unsere Wissenschaftler mit dem Scripps Research Institute und der Florida Atlantic University hervorragende Partner vor Ort. Mit ihnen bildet unser Institut einen leistungsfähigen neurowissenschaftlichen Forschungscluster, der weithin ausstrahlen wird.“ Gruss betonte, dass damit auch die Exzellenz der deutschen Wissenschaft im Spitzenforschungsland USA sichtbarer werde. Im Zuge der Internationalisierung komme der Forschungszusammenarbeit mit den weltweit Besten eine besondere Rolle, erklärte Staatssekretärin Cornelia Quennet-Thielen. Der Bundesstaat Florida fördert den Aufbau des Instituts mit 186 Millionen US-Dollar. Bis 2015 soll das Institut auf 135 Mitarbeiter anwachsen.

Foto: Tracey Benson Photography

Stiftung schüttet Mittel für Nachwuchsforscher aus

Die Behrens-Weise-Stiftung unterstützt die Forschungsarbeiten von fünf Nachwuchsgruppenleitern aus der Max-Planck-Gesellschaft mit jeweils 150 000 Euro. Die Projekte von Tatjana Tchumatchenko (MPI für Hirnforschung), Gergana Dobreva (MPI für Herz- und Lungenforschung), Stefan Rauser (MPI für molekulare Physiologie), Sara Wickström (MPI für die Biologie des Alterns) und Ronald Kühnlein (MPI für biophysikalische Chemie) waren durch die 15 Jurymitglieder – allesamt Max-Planck-Direktoren – als besonders förderungswürdig eingestuft worden. Insgesamt zehn Forschungsgruppenleiter waren nach einer Vorab-Begutachtung zur Teilnahme an der Ausschreibung aufgefordert worden. Die Mittel der Stiftung stammen aus dem Vermögen der 1984 verstorbenen Anna Weise. Sie war 1938 vom Besitzer der Mitteldeutschen Kohlehandelsgesellschaft in Gera, Hans Wilhelm Behrens, nach dem Tod seiner Frau als Alleinerbin eingesetzt worden und rettete Firma und Vermögen über den Krieg. Als Förderndes Mitglied der Kaiser-Wilhelm- und später der Max-Planck-Gesellschaft entschied sie sich – selbst kinderlos –, ihr Vermögen in eine Stiftung zu überführen, die Vorhaben der Max-Planck-Gesellschaft auf dem Gebiet der Biologie, Medizin und Genetik fördern soll.

Ein neuer Blick auf die Wissenschaft

Max-Planck-Bilder auf Russland-Tournee

Keine Frage – die Bilder aus der Wissenschaft sind echte Eyecatcher. Das fanden auch Mitarbeiter des Goethe-Instituts Moskau. Bei der Suche nach einer attraktiven wissenschaftlichen Ausstellung waren sie im Internet auf die Max-Planck-Ausstellung gestoßen (www.bilder.mpg.de). Schnell war allerdings klar, dass es schwierig und teuer sein würde, die großformatigen Bilder nach Russland einzuführen. Die Lösung: eine eigene „Edition“ für Russland. 40 Bilder wurden ausgewählt, vor Ort produziert und im März/April 2012 mit großem Erfolg in den Räumen des Goethe-Instituts Moskau – der ehemaligen DDR-Botschaft – gezeigt. Die große Resonanz seitens des Publikums brachte das Goethe-Institut auf die Idee, die Ausstellung auch an anderen Orten in Russland zu zeigen. Und so werden die Bilder nun in einer Kooperation des Goethe-Instituts und der Max-Planck-Gesellschaft von 2012 bis 2014 in mindestens elf weiteren Orten unter anderem im Wolgagebiet, in Sibirien, am Don und in Südrussland zu sehen sein. Enden wird die Tour voraussichtlich im Herbst 2014 in Wladiwostok am Japanischen Meer. Möglich wird dies auch durch das Deutschlandjahr in Russland, aus dessen Mitteln die Tournee finanziert wird.



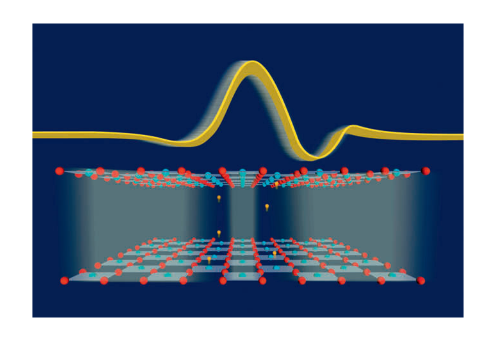


Die zweite Station der „Bilder aus der Wissenschaft“ in Russland war Sankt Petersburg. Mehr als 10 000 Besucher sahen die Ausstellung der MPG im September 2012 in der Russischen Nationalbibliothek.

Max-Planck-Gesellschaft gründet Institut in Hamburg

Hansestadt soll internationales Zentrum für Strukturforschung werden

Der Senat der Max-Planck-Gesellschaft hat auf seiner Sitzung am 26. November 2012 die Gründung des Max-Planck-Instituts für Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg beschlossen. Das neu gegründete MPI geht aus der sehr erfolgreichen MPG-Forschergruppe für strukturelle Dynamik an der Universität Hamburg hervor. „Ich freue mich sehr, dass die international hoch angesehene und fruchtbare Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), der Universität Hamburg und der Max-Planck-Gesellschaft sich weiter intensiviert “, sagte Präsident Peter Gruss. Der Hamburger Senat möchte Hamburg zu einem internationalen Zentrum für die Strukturforschung machen und die internationale Sichtbarkeit des Forschungscampus in Hamburg-Bahrenfeld erhöhen. Das neue Max-Planck-Institut soll zukünftig aus fünf Abteilungen bestehen. Die Stadt Hamburg wird 37 Millionen Euro im Wege der Sonderfinanzierung für einen Neubau leisten. Für das neue Institut kam nur Hamburg als Standort infrage. Zum einen gibt es dort im Rahmen von CFEL eine seit Jahren gewachsene intensive Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg und dem DESY im Bereich der Photonik und Strukturaufklärung. Zum anderen erfordert die besondere Mission des Instituts Zugang zu Hochleistungsstrahlenquellen, wie sie derzeit in Deutschland nur in der Hansestadt mit dem Freien Elektronen Laser FLASH und dem European XFEL, der Synchrotronstrahlungsquelle PETRA-III und der in der Gruppe um Dwayne Miller entwickelten und gebauten relativistischen Elektronenkanone REGAE zur Verfügung stehen.



Die Max-Planck-Forschungsgruppe für Strukturelle Dynamik an der Universität Hamburg hat einen Schalter mit extrem kurzen und starken Terahertzpulsen (gelb) realisiert, um Hochtemperatur-Supraleiter innerhalb einer billionstel Sekunde an- und abzuschalten.

Fotos: Goethe-Institut Moskau (oben, 2), J.M. Harms – Max-Planck-Forschungsgruppe für Strukturelle Dynamik, Hamburg (unten)

„Aus Forschung entsteht Europas Zukunft“

Der deutsche Europaabgeordnete Herbert Reul über Hürden auf dem Weg zu Horizon 2020



Herbert Reul

Die EU-Förderung für Spitzenwissenschaft wird auch für die Max-Planck-Gesellschaft immer wichtiger. 2014 soll Horizon 2020, das neue, auf sieben Jahre angelegte EU-Forschungsrahmenprogramm starten. Ob das Budget, wie von der EU-Kommission geplant, bei etwa 80 Milliarden Euro liegen wird, ist angesichts der Finanzkrise nicht sicher. Zu diesem Thema sprachen wir mit dem deutschen Europaabgeordneten Herbert Reul (CDU), der als Mitglied des Forschungsausschusses die Verhandlungen über das Paket begleitet.

Seit mehr als einem Jahr wird über die Ausgestaltung von Horizon 2020 diskutiert, jetzt haben die Staats- und Regierungschefs beim EU-Gipfel erneut die Bremse gezogen. Bei all diesem Hin und Her: Macht Ihnen EU-Politik da noch Spaß?

Herbert Reul: Natürlich macht sie Spaß, aber klar ist auch: EU-Politik ist zäh, weil immer viele Sachverhalte und viele nationale Interessen zusammenkommen. Und dann gibt es mit Kommission, Rat und Parlament drei verschiedene Player. Die angesprochene Bremse betrifft aber nicht Horizon 2020, sondern die Festlegung auf die Vorgaben der mehrjährigen Finanzplanung für die EU insgesamt.

Aber solange zum EU-Finanzrahmen, der dem Kommissionsvorschlag zufolge bei etwa 1000 Milliarden Euro für 2014 bis 2020 liegen soll, keine Entscheidung gefallen ist, gibt es auch keine Gewissheit über die Höhe des Horizon-Budgets?

Das ist richtig. Die Festlegung auf den Gesamtrahmen ist gerade in der aktuellen Situation ein Thema, das besonders viel Zeit braucht. Schließlich hängt von so einem Finanzplan sehr viel ab – nicht nur die Frage, wie viel Geld wir für Horizon bekommen, sondern auch, wie viel dann woanders nicht ausgegeben wird. Und: Wie passt das in die Schuldensituation der Mitgliedstaaten?

Was sind die Hauptpositionen der Mitgliedstaaten?

Da gibt es mehrere Gruppen. Einige Mitgliedstaaten wollen Wachstum beim EU-Budget, andere sagen: Wir müssen eine gewisse Kürzung im Vergleich zum Kommissionsvorschlag haben. Und die dritte Gruppe argumentiert, dass es eine sehr starke Kürzung braucht. Generell herrscht aber die Tendenz: Die Mittel müssen reduziert werden, weil wir sie nicht mehr aufbringen können.

Wo gespart werden soll, ist aber strittig.

Ja, weil es verschiedene Interessenlagen gibt. Mitgliedstaaten, die derzeit in besonderen finanziellen Schwierigkeiten stecken und sehr von den Strukturfonds zum Ausbau der Infrastruktur profitieren, sagen natürlich: Bitte überall dort sparen, nur nicht bei den Strukturfonds. Dazu kommen diejenigen, die eine starke Agrarlobby haben. Diese Länder sagen: Überall sparen, aber nicht bei der Landwirtschaft. Weil das in der Regel auch die Staaten sind, die nicht so stark von den Forschungsmitteln profitieren, liegt es aus deren Sicht nahe, dieses Budget zu reduzieren. Nach dem Motto: Wenn kürzen, dann bitte nicht bei mir, sondern woanders.

Wie lässt sich das Dilemma lösen?

Erstens: Es ist insgesamt richtig, dass wir auch mit unserem Haushalt sparsam umgehen. Wir können nicht überall in Europa sparen, nur beim EU-Etat nicht. Zweitens: Wenn wir schon sparen müssen, dann halte ich das in jedem Bereich außer im Forschungsbereich für berechtigt. Schließlich entsteht gerade daraus die europäische Zukunft.

Staaten, die weniger forschungsstark sind, argwöhnen, dass sie zu wenig von den Forschungsgeldern bekommen …

Ja, es gibt diese Ungleichgewichte. Aber es gibt eine Lösung, die ich auch als Vorschlag ins Parlament eingebracht habe: Wenn man das Prinzip Gießkanne nicht will, sondern die Exzellenz als entscheidendes Förderkriterium, dann muss man überlegen: Wie kann ich Staaten, in denen die Forschung noch nicht so ausgebaut ist, nach vorne bringen? Das geht, indem man aussichtsreiche Regionen dieser Staaten zusammenbringt mit exzellenten Forschungseinrichtungen. Gemeinsam werden Zentren der Spitzenforschung etabliert. Die Gelder sollen über einen Wettbewerb verteilt werden. Das setzt noch mehr Kräfte frei, sich zusammenzutun. Finanziert werden würde das über Strukturfondsmittel für die nötige Infrastruktur und über Mittel des Forschungsbereichs, wenn es um die wissenschaftliche Arbeit geht. Das ist der Gedanke von Teaming Excellence. Langsam sind wir, glaube ich, auf einem guten Weg, dafür Mehrheiten zu gewinnen. Auch dank der Unterstützung der Max-Planck-Gesellschaft und ihres Präsidenten. Schließlich kann die Max-Planck-Gesellschaft – gerade was den Aufbau von Instituten in den neuen Bundesländern angeht – exemplarisch zeigen, dass ein solches Modell funktioniert.

Erkennen Sie Interesse bei jenen Staaten, an die sich Teaming Excellence richtet?

Ja, das Interesse wächst. Auch in den Verhandlungen im Rat höre ich, dass sie auf dem Weg sind, das zu ihrem Projekt zu machen. Das ist ja das Wichtigste: Gelingen kann es nur, wenn diese Staaten nicht mehr nur ihre Strukturmittel im Kopf haben, sondern auch diese neue Chance erkennen.

Damit Horizon ab 2014 greifen kann, braucht es bald eine Einigung zum Gesamtbudget der EU. Wie optimistisch sind Sie?

Meine Hoffnung ist, dass es gut geht und sich die Staats- und Regierungschefs im Frühjahr 2013 einigen. Und dann kommt es darauf an: Ist die Einigung so, dass das Parlament sie akzeptieren kann? Oder sind die Kürzungen so dramatisch, dass wir sie nicht akzeptieren? In einem solchen Fall würde praktisch der derzeit gültige Finanzrahmen fortgeschrieben, sodass die EU finanziell handlungsfähig bliebe. Es würde aber etliche Nachteile mit sich bringen, weshalb auch bei den Mitgliedstaaten der Wille da ist, zu einer Lösung zu kommen.

Interview: Jens Eschert

Foto: Europäisches Parlament

Erfolg beim GO-Bio-Wettbewerb

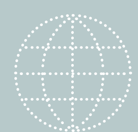
Mit dem GO-Bio-Wettbewerb hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) auf die Schwierigkeiten Gründungswilliger bei der Beschaffung von Risikokapital reagiert. Das Programm ist explizit auf die langwierigen und kostspieligen Entwicklungsprozesse im Life-Science-Bereich zugeschnitten. Über maximal sechs Jahre finanziert das BMBF die Forscher, um eine wissenschaftliche Idee zu einem marktfähigen Produkt weiterzuentwickeln und langfristig ein Unternehmen zu gründen. Die Förderung erfolgt in zwei Phasen, wobei über die zweite Phase erst im Rahmen der Zwischenevaluation nach drei Jahren entschieden wird. In der fünften Auswahlrunde von GO-Bio wurden insgesamt fünf Teams gekürt, die sich über eine Anschubfinanzierung von rund zehn Millionen Euro freuen dürfen – darunter auch Stefan Luther vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Er will auf der Basis seiner Forschungsergebnisse (siehe http://www.mpg.de/4365076/) einen neuartigen implantierbaren Cardioverter-Defibrillator mit deutlich geringerer Pulsenergie entwickeln. Für viele Patienten mit implantiertem Cardioverter-Defibrillator könnte die neue Technik Schmerzen vermindern, die Erfolgsrate der Behandlung erhöhen, die Lebensdauer der Batterie verlängern und damit die Häufigkeit des chirurgischen Geräteaustausches reduzieren.



Stefan Luther (Mitte) vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation erhält die GO-Bio-Förderung, um eine neue Generation von Defibrillatoren zu entwickeln. Mit ihm freuen sich die Kollegen Eberhard Bodenschatz (rechts) und Ulrich Parlitz.

Foto: BMBF – Florian Dahnke

Ins Netz gegangen



Das Protein-Inventar des Menschen
Kaum ist das Human Genome Project abgeschlossen, wollen Forscher nun das gesamte Protein-Inventar des Menschen katalogisieren. Sie erhoffen sich davon neue Erkenntnisse zur Funktionsweise von Zellen und zu den Ursachen von Erkrankungen. Wie ist der aktuelle Stand der Forschung? Welche Wissenschaftler arbeiten in der Max-Planck-Gesellschaft an diesem Thema? Unser neues Dossier Proteomik nähert sich der Proteinchemie mit vielen Hintergrundberichten und Videos und vermittelt so gebündelt detailliertes Wissen:
www.mpg.de/6348101/Proteomik

Science-Fiction-Kulisse
In der Plasmakammer von ASDEX Upgrade in Garching kann es über 100 Millionen Grad heiß werden. Ein virtueller Rundgang führt den Betrachter mitten in das Herz der Fusionsforschungsanlage. Diese soll die Bedingungen für ein Kraftwerk ausloten, in dem miteinander verschmelzende Atomkerne Energie liefern, ähnlich der der Sonne. Via PC, Tablet-Computer oder Smartphone kann der Besucher jetzt den Blick in alle Winkel werfen. In kurzen Videos erklären Wissenschaftler ihren Arbeitsplatz. Aufgenommen hat die Panoramen der Münchner Fotograf Volker Steger. Für die Kugelpanorama-Projektion erhielt er den Deutschen Preis für Wissenschaftsfotografie 2012 in der Kategorie Einzelfoto. Die Jury lobte die „geheimnisvolle Anmutung einer Science-Fiction-Kulisse".
www.ipp.mpg.de/panorama

Wo Wissenschaftler arbeiten
Die Serie „Orte der Forschung", die in jeder Ausgabe von MaxPlanckForschung erscheint, finden Sie jetzt auch als Bildergalerie im Internet. Ob im Regenwald des Amazonas, im Labyrinth eines großen Rechenzentrums oder am Radioteleskop in Effelsberg – die Fotografien und Bildtexte vermitteln anschaulich, wie unterschiedlich Wissenschaftler arbeiten und wie vielfältig ihre Forschungsarbeit ist.
www.mpg.de/6343725/Orte_der_Forschung

Kulturkampf um die Gentechnik

Die Diskussion über die Gefahren genetisch veränderter Organismen wird emotional und immer stärker abgehoben von den wissenschaftlichen Zusammenhängen geführt – vor allem wenn es um die Anwendung in der Landwirtschaft geht. Die radikale Ablehnung verbaut Perspektiven und führt zu Problemen, welche die Gegner eigentlich verhindern wollten. Nach Ansicht unseres Autors ist es daher an der Zeit, die Diskussion neu zu beginnen.

TEXT **DIETHARD TAUTZ**

In einem Kommentar im Feuilleton der Süddeutschen Zeitung zu deutsch-amerikanischen Kulturunterschieden war kürzlich zu lesen: „Da ist dieses unheimliche Gefühl, dass einem dieses Land, das man doch so liebt (Manhattan, Dylan, Philip Roth), letztendlich doch sehr fremd ist (Genfood, Wall Street, George W. Bush).“ Wie sind wir nur so weit gekommen, dass genetisch veränderte Lebensmittel, also Genfood, zu einem Kulturunterschied zwischen Europäern und Amerikanern geworden sind?

Frühere Extrempositionen bestimmen heute die Diskussion

In Kalifornien wurde sogar eine Gesetzesinitiative, welche die Kennzeichnung gentechnisch hergestellter Lebensmittel vorsah, mehrheitlich von der Bevölkerung abgelehnt. Warum wird die Gentechnik bei uns mit dem Gefühl von Gefahr verbunden, die dann insbesondere bei Nahrungsmitteln leicht ins Emotionale gleiten kann? Tatsächlich scheint die Diskussion um die Gentechnik an den Extrempositionen hängen geblieben zu sein, die in den 1980er-Jahren entwickelt wurden. Diese waren vor allem von den aktiven Auseinandersetzungen um die Gefahren der Atomtechnik geprägt, angereichert mit allgemeinen gesellschaftlichen Themen.

In einer sehr eingehenden Analyse schreibt der Historiker Joachim Radkau bereits 1988: „Die Opposition gegen die Gentechnik gründete sich nur teilweise auf befürchtete Mängel der technischen Sicherheit, mehr noch auf die Sorge, dass beunruhigende Tendenzen, auch wenn sie keine aktuelle Gefahr darstellten, durch die Erfolge der Molekularbiologie neuen Auftrieb bekommen würden: der manipulative Umgang mit der Natur; die Züchtung von Monokulturen, die auf massiven Herbizid-Einsatz angewiesen sind; die Medikamenten-Medizin; die Bevormundung der Frauen; die Ersetzung von Umwelt- und Sozialpolitik durch Selektion mit dem Ziel des optimal angepassten Menschen. Es war nicht zuletzt der Rückblick auf Vergangenes, der diese Zukunftssorgen auslöste.“ >

Harte Fronten: Der Streit zwischen Gegnern und Befürwortern der Gentechnik entzündet sich auch an Produkten wie dem *Golden Rice* (rechts), den Forscher mit dem Ziel kreiert haben, die hohe, durch Vitamin-A-Mangel verursachte Kindersterblichkeit in Entwicklungsländern zu senken. Ihre goldene Farbe erhält die Reissorte von Vitamin-A-Vorstufen in den Körnern.

Foto: Kai Weinsziehr



Die Diskussion um die Gefahren der Gentechnik diente also letztlich nur als Ersatz für ein Sammelsurium ganz anderer gesellschaftlicher Probleme. Der Vergleich mit der Atomenergie war dabei ein besonders schlagendes Argument, obwohl er nie richtig passte. Während radioaktive Stoffe eine echte, messbare Gefahr darstellen, vor der man sich durch technische Einrichtungen schützen muss, geht von der Gentechnik an sich keine Gefahr aus. Gene sind nicht giftig, weder in ihrer natürlichen noch in einer neu kombinierten Form.

Zwischen Arten kommt es natürlicherweise immer wieder zu Gentransfers

Als sich die Methodik der Gentechnologie Anfang der 1970er-Jahre in ihren Grundzügen abzeichnete, kamen den beteiligten Wissenschaftlern Bedenken, ob es dabei nicht unabsichtlich zur Kombination von unterschiedlichem Erbmaterial kommen und damit neue gefährliche Organismen entstehen könnten. Als es möglich wurde, das Genom infektiöser Viren in Bakterien einzuschleusen, entschied man sich zu einem Moratorium und einer Konferenz über künftige Sicherheitsrichtlinien.

Die Konferenz fand Anfang 1975 im kalifornischen Asilomar statt. Gentechnik wurde damals definiert als Methodik, bei der Nukleinsäuren verschiedener Arten kombiniert und in vermehrungsfähige Organismen eingeschleust werden. Darüber hinaus legte man die generellen Richtlinien für Sicherheitsmaßnahmen fest, die dann Jahre später in vielen Staaten auch in die Gesetzgebung einflossen.

Inzwischen sind fast 40 Jahre vergangen, und es hat gewaltige Erkenntnisfortschritte gegeben. Die damaligen Befürchtungen, die zu dem Moratorium führten, haben sich im Nachhinein als unbegründet herausgestellt. So wissen wir inzwischen, dass die Neukombination von Genmaterial unterschiedlicher Organismen ein ganz natürlicher Vorgang ist: Bei Mikroorganismen, Pilzen, ja selbst bei höheren Organismen kommt es immer wieder zu natürlichen Gentransfers zwischen Arten.

Zudem ist heute bekannt, dass Viren, die höhere Organismen infizieren, in Bakterien gar nicht aktiv werden können. Tatsächlich hat es bis heute noch keinen einzigen gentechnischen Unfall gegeben, obwohl inzwischen Tausende von Laboren täglich mit dieser Technik arbeiten.

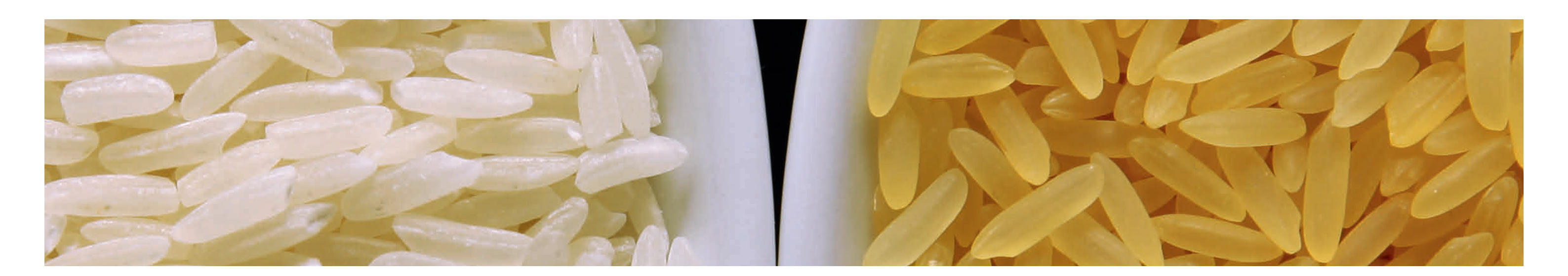
Als mögliche Gefahren haben Kritiker der Gentechnik daher fiktive Katastrophenszenarien konstruiert, wie etwa die unkontrollierte Freisetzung eines neuen infektiösen Bakteriums, Virus oder auch eines Tiers oder einer Pflanze, die ökologische Schäden verursachen könnten. Dies hat dazu geführt, dass viele Menschen die Gentechnik für noch gefährlicher halten als die Atomtechnik, da diese Organismen als nicht rückholbar gelten.

Dabei sind infektiöse Bakterien und Viren schon immer Teil unserer natürlichen Umwelt gewesen. Ebenso haben sich gerade in den vergangenen Jahrzehnten Tiere und Pflanzen immer wieder in Gebieten ausgebreitet, in denen sie vorher nicht vorkamen. Diese Bedrohungen sind also zwar real, aber nicht neu. So müssen wir uns etwa intensiv mit dem Problem der natürlichen Entstehung von Resistenzen gegen Antibiotika auseinandersetzen. Demgegenüber sind die Gefahren eines gentechnischen Unfalls verschwindend gering.

Es gibt in der Diskussion um die Gentechnik viele Facetten. Einerseits wird dabei fast immer übersehen, dass Verfahren und Produkte, die auf Gentechnik basieren, schon längst ihren Weg in den Alltag gefunden haben. Dazu gehören Arzneimittel, etwa Insulin, aber auch Enzyme in Waschmitteln, welche die Reinigungswirkung bereits bei niedriger Temperatur entfalten und zum Ende der Kochwäsche geführt haben. Gentechnikprodukte finden sich also in jedem Haushalt. Auf der anderen Seite hat die Auseinandersetzung um Genfood die erwähnte kulturelle Dimension erreicht, in der die wissenschaftliche Argumentation fast keine Rolle mehr spielt.

Das zeigt auch das große Medienecho einer Langzeitstudie französischer Wissenschaftler im Herbst 2012. Die Forscher kommen darin fälschlicherweise zu dem Schluss, dass Ratten wesentlich öfter an Krebs erkrankten, wenn sie mit genmodifiziertem Mais gefüttert wurden. Die Nachricht und die dazugehörigen Filme kamen sofort und ohne kritische Recherche in die Schlagzeilen und die Abendnachrichten.

Dabei hatten die französischen Wissenschaftler einen Rattenstamm verwendet, der für Langzeitstudi-



en nicht geeignet ist, weil die Tiere natürlicherweise im Alter eine hohe Krebsrate aufweisen. Außerdem verletzten die Forscher grundlegende statistische Regeln zum Versuchsdesign und interpretierten ihre Daten falsch.

Einen Tag später erschienen Stellungnahmen von unabhängigen Wissenschaftlern, die auf die wesentlichen Schwachpunkte der Arbeit hinwiesen. Doch da war es schon zu spät. Schließlich stellte es sich heraus, dass die Arbeiten von einer Anti-Gentechnik-Organisation finanziert wurden und der Autor der Arbeiten mediale Aufmerksamkeit für ein neues Buch brauchte.

Eigentlich geht es in der Genfood-Diskussion meist gar nicht mehr um wissenschaftliche Zusammenhänge, sondern um Sekundärfragen wie die Marktmacht von Konzernen. Der Streit um die Gentechnik in der Landwirtschaft hat sich daher schon längst zu einer Auseinandersetzung um die Rolle von Großkonzernen in der Nahrungsmittelproduktion entwickelt. Kurioserweise führt die Fundamentalopposition aber gerade dazu, dass nur noch große Konzerne Gentechnik in der Landwirtschaft einsetzen, da kleinere Firmen oder auch Non-Profit-Initiativen von dem Widerstand und den regulatorischen Auflagen überfordert sind. Ein freier Markt wird auf diese Weise verhindert.

Die biologische Landwirtschaft wird dagegen als Gegenmodell verklärt, in dem Bauern unabhängig vom Einfluss der Konzerne anbauen können, was sie für richtig halten, und ihr eigenes Saatgut selbst erwirtschaften. Dabei haben sich die Konzerne ganz unabhängig von der Gentechnik durch klassische Züchtung Monopole geschaffen, welche die Bauern dazu zwingen, jährlich neues Saatgut von ihnen zu kaufen.

Von vielen Kulturpflanzen, insbesondere vom Mais, werden Hybride angebaut, für die in jeder Generation das Saatgut durch spezielle Kreuzungen neu erzeugt werden muss. Die Hybride aus zwei Linien können wesentlich höhere Erträge liefern, und die Konzerne optimieren dies seit Jahrzehnten, um ihren eigenen Geschäftsbereich zu sichern.

Ein hoher Ernteertrag lässt sich theoretisch aber ebenso durch reine Zuchtlinien erzielen. Es ließen sich also Sorten mithilfe gentechnischer Eingriffe erzeugen, die nicht auf diese Hybridisierung angewiesen sind, die hohe Erträge liefern und bei denen das Saatgut aus der Ernte abgezweigt wird. Der Widerstand gegen die Gentechnik in der Landwirtschaft würde aber verhindern, dass solche Sorten angebaut werden, oder bewirken, dass die Kosten für deren Einführung für kleine Unternehmen zu hoch wären.

Könnte es sein, dass gerade die großen Konzerne ein Interesse daran haben, den Widerstand gegen die Gentechnik in der Landwirtschaft aufrechtzuerhalten, um sich dadurch Konkurrenz und neue Entwicklungen vom Leib zu halten? Inzwischen lassen sich mit entsprechend hohem Aufwand manche der durch Gentechnik angestrebten Veränderungen auch durch klassische Züchtungsverfahren erreichen. Dazu gehört die Erzeugung von Mutanten mittels radioaktiver Bestrahlung – auch das eine der irrationalen Volten in der Diskussion: Einsatz von Gentechnik gilt als gefährlich, der Einsatz von Atomtechnik als klassisch.

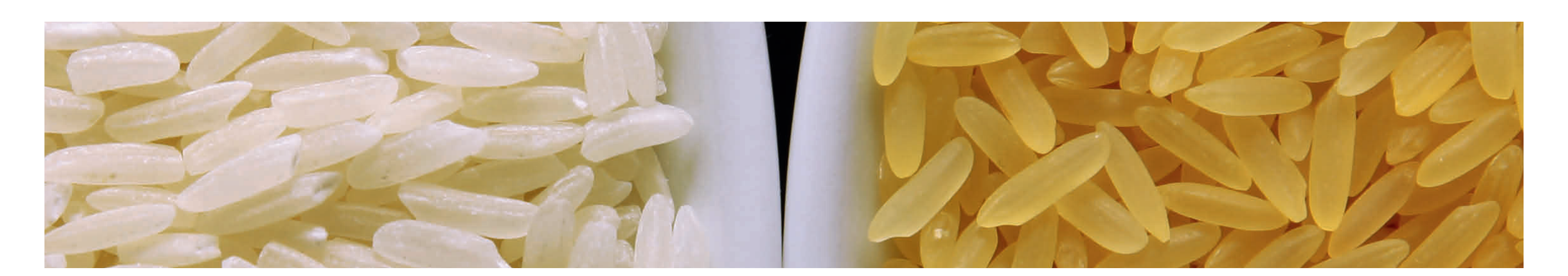
Gerade in Bezug auf Herbizid-resistente Sorten befinden wir uns dadurch in einer kuriosen Situation: Die Gegner der Gentechnik haben gerade solche Sorten immer als besonders extreme Verirrung der Gentechnik in der Landwirtschaft gebrandmarkt – und ihre Einführung in Europa dadurch mehr oder weniger verhindert.

> Viele der befürchteten Risiken betreffen auch klassische Züchtungsverfahren

Inzwischen sind aber durch klassische Zuchtmaßnahmen entstandene Herbizid-resistente Sorten unter dem Produktnamen „Clearfield“ praktisch ohne Regulierung auf dem Markt, obwohl für sie alle Folgeprobleme hinsichtlich des Herbizid-Einsatzes und der Verbreitung der Resistenz auf andere Pflanzen genauso zutreffen wie für die gentechnisch modifizierten Sorten. Die Risikodiskussion um die Gentechnik ist hier vollkommen ad absurdum geführt.

Die Auseinandersetzung um die Entwicklung und die Einführung des *Golden Rice* stellt ein besonders anschauliches Beispiel dar, wie irrational die Diskussion um die Gentechnik in der Landwirtschaft längst geworden ist. Diese genetisch veränderten Reispflanzen wurden von Wissenschaftlern mit dem Ziel entwickelt, die hohe, durch Vitamin-A-Mangel verursachte Kindersterblichkeit in Entwicklungsländern zu senken. >

Foto: Kai Weinsziehr



Solche Reissorten könnten heute schon angebaut werden. Kleinbauern müssten für sie keine Lizenzen bezahlen, und sie würden das Leben und die Gesundheit vieler Kinder retten. Aber aufgrund der hohen bürokratischen Hürden und der Opposition von Umweltorganisationen bleibt es fraglich, ob es jemals zu einem flächendeckenden Anbau kommt.

Die Organisation foodwatch kommentiert das wie folgt: „Die humanitäre Motivation der *Golden Rice*-Macher gerät ins Zwielicht einer Kampagne, mit der gentechnisch veränderten Nahrungsmitteln zum Durchbruch verholfen werden soll, indem man sie als einziges Mittel gegen gefährliche Mangelernährung darstellt. Ein Projekt, mit dem gleichermaßen das Image der Gentechnik verbessert, Standards für die Risikoprüfung abgesenkt und Kritiker von Gentechnik-Nahrung moralisch unter Druck gesetzt werden sollen.“ Da es offensichtlich keine Argumente mehr gibt, um die gentechnische Veränderung als solche gefährlich erscheinen zu lassen, werden also Ersatzargumente angeführt, die mit der Sache selbst nichts zu tun haben.

> Es ist ein rechtsstaatliches Unikum, dass der Gesetzgeber etwas reguliert, was er als ungefährlich ansieht

Aber auch außerhalb der Landwirtschaft ist es rund um die Gentechnik zu Entwicklungen gekommen, die nicht mehr zeitgemäß sind. Aus den Empfehlungen der erwähnten Asilomar-Konferenz sind gesetzliche Vorschriften zum Umgang mit der Gentechnik entstanden. So wurden vier Sicherheitsstufen eingeführt, gekennzeichnet S1 bis S4. Diese regeln hauptsächlich den Umgang mit Organismen, von denen bekannte Gefahren ausgehen, etwa infektiöse Bakterien und Viren.

Die niedrigste Sicherheitsstufe S1 ist laut Gesetzestext anzusetzen für „gentechnische Arbeiten, bei denen nach dem Stand der Wissenschaft nicht von einem Risiko für die menschliche Gesundheit und Umwelt auszugehen ist“. Dennoch unterliegen diese Arbeiten strikter Regulierung und behördlicher Überwachung.

DER AUTOR



Diethard Tautz, Jahrgang 1957, studierte Biologie in Frankfurt am Main und Tübingen. Er forschte unter anderem im britischen Cambridge, in München und Köln. Seit 2007 ist Tautz Direktor der Abteilung Evolutionsgenetik am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön. Er untersucht dort Gene, die eine Anpassung an die natürliche Umwelt ermöglichen. Diethard Tautz ist Vizepräsident des Verbandes Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland e.V. (VBIO). Seit 2008 ist er gewähltes Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina.

Da die meisten gentechnischen Arbeiten in dieser Kategorie stattfinden, ist ein großer bürokratischer Überbau gewachsen. Milliardenteure Investitionen sind notwendig, um Auflagen zu erfüllen, die keine zusätzliche Sicherheit bieten. Tatsächlich ist es ein rechtsstaatliches Unikum, dass der Gesetzgeber etwas reguliert, was er gleichzeitig als ungefährlich ansieht.

Eine neue Diskussion über die Gentechnik, basierend auf dem heutigen Stand des Wissens, erscheint mir überfällig. Wenn die derzeitige Blockade in der öffentlichen Diskussion nicht aufgelöst wird, behindern wir neben der Landwirtschaft und der Wissenschaft auch ganz andere Bereiche. So könnte die Umstellung unserer Wirtschaft vom Verbrauch fossiler Rohstoffe hin auf nachwachsende Rohstoffe – die sogenannte Bioökonomie – enorm von der Gentechnik profitieren.

Spätestens der 40. Jahrestag der Konferenz in Asilomar 2015 wäre eine geeignete Gelegenheit, die Diskussion wieder aufzunehmen. Denn eine moderne Gesellschaft kann sich den irrationalen Kulturkampf um die Gentechnik nicht leisten. ◂

Foto: Kai Weinsziehr (oben), privat (kleines Bild)

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler – und solche, die es werden wollen:

Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

Vorteilsabo sichern!

abo@verlag-jungewissenschaft.de
Stichwort: „Vorteilsabo“

Leseprobe anfordern!

leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de
oder per Fax 0211/385489-29

www.verlag-jungewissenschaft.de

Vorteilsabo nur 20,-€*

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer (4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)*

*zzgl. Versandkosten

Was das Auge nicht sieht: Rund 400 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt treibt der Comahaufen im All. Optische Teleskope zeigen nur die einzelnen Galaxien (graue Flecken). Röntgenspäher wie der Satellit *Rosat* hingegen enthüllen eine ausgedehnte Gasatmosphäre (rot).

Die Architektur **des Alls**

Das Universum gleicht einer unfassbar großen Honigwabe. Gigantische Galaxienhaufen besetzen die Knotenpunkte der wächsernen Wände um die Zellen aus leerem Raum. **Hans Böhringer** vom **Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik** in Garching untersucht diese Ansammlungen von Milchstraßen. Dabei begegnet er den unsichtbaren Seiten des Weltalls.

TEXT **HELMUT HORNUNG**

Das Foto ist ziemlich düster, weite Teile glimmen in einem violetten Schwarz. Aber vor allem in der oberen Hälfte ändert sich das Bild: Da erhellen Abermillionen Lichter die Szene. Die meisten scheinen nicht isoliert, sondern reihen sich zu funkelnden Ketten aneinander, bilden netzförmige Muster mit hellen Klecksen. Die US-Raumfahrtbehörde Nasa hat das Foto Anfang Dezember 2012 veröffentlicht, der Satellit *Suomi NPP* die Einzelaufnahmen geschossen, aus denen es zusammengesetzt ist. Es zeigt – die Erde bei Nacht.

Das Bild weckt bei jedem Betrachter andere Assoziationen. In beeindruckender Weise spiegelt sich das Nord-Süd-Gefälle auf unserem Planeten wider: Viele Lichter bedeuten große Städte und dichte Besiedelung wie in Europa oder Nordamerika; Afrika ist, mit Ausnahme der Südspitze, nahezu schwarz. Einen Astronomen wiederum mag das Bild an Überirdisches erinnern. An nicht weniger als den Bau des Weltalls. Denn betrachtet man das Universum als Ganzes, wirkt es keineswegs homogen. Vielmehr durchziehen Filamente den Raum und bilden ein Netzwerk, das den Blasenwänden eines kosmischen Schaumbads gleicht. Oder den Zellwänden einer Honigwabe. Die hellen Strukturen markieren dabei die Ballungsräume der Materie, die dunklen sind gigantische Leeren, *voids* genannt.

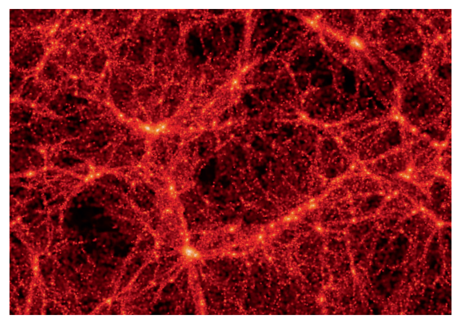
Wie kommt das Weltall zu solch einer wabenförmigen Struktur? Um das herauszufinden, betreibt Hans Böhringer am Garchinger Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik so etwas wie Kosmografie – kosmische Geografie: Ähnlich wie die hellen Lichter auf den Nasa-Bildern den Konturen der Kontinente folgen, zeichnen Galaxienhaufen die Architektur des Alls nach. Viele von ihnen würden demnach den Großstädten entsprechen. Auch unsere Milchstraße ist Teil eines Haufens: der Lokalen Gruppe. Diese hat etwa 40 Mitglieder und gleicht eher einem Vorort; wenigstens gehört sie zu einer Megacity, dem Virgo-Superhaufen.

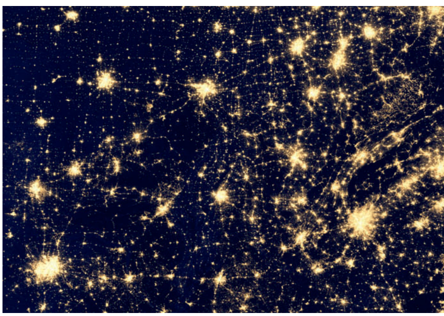
„Galaxienhaufen sind die größten klar definierten Objekte im Universum“, sagt Böhringer. Sie umfassen bis zu einige Tausend Milchstraßen, jede ein System aus Milliarden von Sternen, Gas- und Staubwolken. Unsere Sonne ist einer von ungefähr 200 Milliarden Sternen, die zusammen mit der interstellaren Materie eine solche Galaxie bilden. Die Schwerkraft, die auf der Erde einen Stein zu Boden fallen lässt, bindet die Galaxien eines Haufens mit unsichtbaren Ketten aneinander. „Unsichtbar“ – ein Wort, das Böhringers Forschungen bestimmt.

DER RAUM IST LEER – NACH IRDISCHEN MASSSTÄBEN

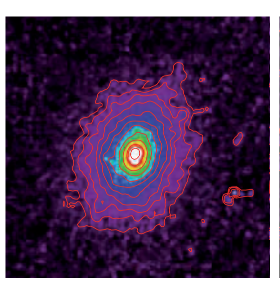
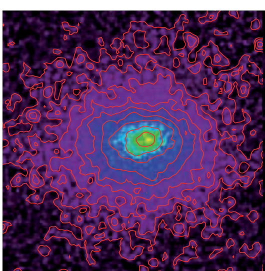
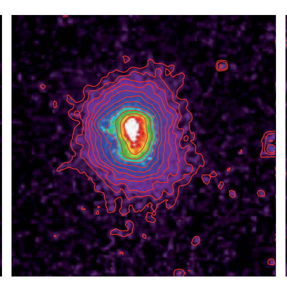
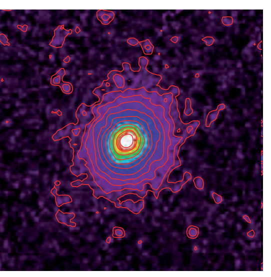
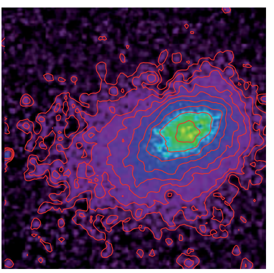
Zum einen ist da die Dunkle Materie, die fast ein Viertel des Weltalls ausmacht. Die ersten Hinweise auf diesen bis heute rätselhaften Stoff fand Fritz Zwicky im Jahr 1933 bei der Beobachtung des Comahaufens, eines 400 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxienhaufens mit mehr als 1000 Mitgliedern. Der schweizerische Astronom schätzte, dass das 400-Fache der sichtbaren Masse nötig sei, um das Gebilde als Ganzes in Form zu halten; die Schwerkraft der

Himmel und Erde: Das kosmische Netz aus Materiefilamenten (links) hat verblüffende Ähnlichkeit mit Aufnahmen unseres Planeten bei Nacht (rechts). Die hellen Knoten markieren jeweils Ballungsräume – Materie im einen, Städte im anderen Fall.





Fotos: MPI für extraterrestrische Physik (linke Seite); MPA Garching - Virgo Collaboration (links), NASA (rechts)

Galerie der Galaxien: Auf den Bildern ferner Haufen haben die Wissenschaftler die Strahlungsintensität der Röntgenhalos farblich codiert. Das Gas – ein Plasma aus Ionen und Elektronen – hat extrem hohe Temperaturen von mehreren Dutzend bis 100 Millionen Grad. Die Spektralanalyse liefert noch weitere wichtige Daten über das intergalaktische Medium, etwa dessen chemische Zusammensetzung.

sichtbaren Milchstraßen reicht dazu bei Weitem nicht aus. („Die Jagd nach dem Unsichtbaren“, Seite 34 ff.)

Zum Zweiten steckt in einem Galaxienhaufen jede Menge heißes Gas. Der Raum zwischen den einzelnen Sternsystemen ist praktisch leer – aber nur für irdische Verhältnisse. „Die Dichte liegt um viele Größenordnungen unter der eines Laborvakuums“, sagt Böhringer. „Dennoch gibt es genügend Teilchen, sodass sich die Gesamtmasse des Gases zum Fünffachen der Masse aller Galaxien aufaddiert.“ Um die hohen Temperaturen des galaktischen Gases zu verstehen, genügt einfache Physik.

In den Comahaufen etwa fällt das Material mit einer Geschwindigkeit von 1000 Kilometern pro Sekunde ein. Während dieses Sturzflugs wandelt es seine potenzielle Energie in kinetische um. Mit Überschallgeschwindigkeit prallt das einstürzende Gas auf solches, das sich bereits im Haufen zwischen den Galaxien befindet. Bei der Kollision werden die Teilchen abgebremst, aus Bewegung entsteht Wärme. Die typischen Temperaturen liegen bei einigen Dutzend bis zu 100 Millionen Grad. Und die Masse des Materials ist auch nicht gerade zu verachten: „Im Comahaufen entspricht die Gasmasse ungefähr der von einer Billiarde Sonnen“, sagt Hans Böhringer.

ENERGIEREICHE STRAHLUNG MIT KURZEN WELLENLÄNGEN

Gewogen hat Böhringer den Comahaufen allerdings nicht. Ja, er hat das Gas – ein Plasma aus Ionen und Elektronen – noch nicht einmal mit eigenen Augen gesehen. So absurd es klingen mag: Es ist für optische Teleskope unsichtbar. Vielmehr sendet die heiße Materie überwiegend energiereiche Strahlung bei extrem kurzen Wellenlängen aus. Und dieses Röntgenlicht lässt sich nur mit speziellen Detektoren jenseits der Erdatmosphäre auffangen.

Der am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelte Satellit *Rosat* war ein solcher Detektor (MaxPlanckForschung 1/2012, Seite 94 f.). Von Juni 1990 bis Februar 1999 spürte der Späher an die 125 000 Röntgenquellen auf. Hinter 2000 der hellsten Strahler verbergen sich Galaxienhaufen, genauer: ihre Halos. So nennen Astronomen die galaktischen Gashüllen, die wie Atmosphären in den Haufen zwischen den einzelnen Galaxien sitzen. Aus deren Analyse lassen sich eine Menge von Erkenntnissen ableiten, denn im Röntgenlicht können Forscher die Halos vollständig durchleuchten.

Die Halos sind „optisch dünn“, das heißt durchsichtig, weil die Photonen in dem fein verteilten Gas freie Bahn haben. Daher tragen diese Lichtteilchen die Botschaften von allen möglichen atomaren Prozessen ungehindert nach draußen. Werden in dem Gas etwa freie Elektronen beschleunigt oder gebremst, senden sie Röntgenlicht aus; und stoßen sie mit Atomen zusammen, kommt es zur Abstrahlung von Spektrallinien. Diese sind für jedes Element ebenso charakteristisch wie die Fingerabdrücke für einen Menschen. Um die Linien aufzuspüren, zerlegen Astronomen das Licht in Spektren und erhalten unter anderem Aufschluss über die Inhaltsstoffe des Gases. „Wie nicht anders zu erwarten, besteht es zu 80 Prozent aus Wasserstoff und Helium, den häufigsten Elementen im Kosmos“, sagt Hans Böhringer.

Allerdings finden sich noch andere Zutaten wie Kohlen-, Sauer- und Stickstoff, Nickel, Eisen, Magnesium, Silicium oder Calcium. Auch das verwundert



Genialer Querulant: Fritz Zwicky (1898 bis 1974) galt als schwieriger Zeitgenosse. Friedrich Dürrenmatt diente er als Vorbild für die Figur des Johann Wilhelm Möbius im Drama *Die Physiker*. Im Jahr 1933 entdeckte Zwicky bei der Untersuchung des Comahaufens die Dunkle Materie.

Fotos: MPI für extraterrestrische Physik (oben), OH (unten)



Ballungsraum: Einige Tausend Milchstraßensysteme stehen im mehr als 20 Millionen Lichtjahre durchmessenden Comahaufen beieinander, die Schwerkraft hält sie zusammen. Diese Aufnahme im sichtbaren Licht zeigt die hellsten davon und verrät nicht, dass das Konglomerat aus Galaxien in heiße Gaswolken eingebettet ist und 87 Prozent seiner Masse in der Dunklen Materie stecken.

Foto: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

den Fachmann nicht allzu sehr, handelt es sich dabei doch um Elemente, die massereiche Sterne erbrütet und am Ende ihres Lebens in einer Supernova freigesetzt haben. „Auf diese Weise testen wir Modelle der Sternentwicklung."

Aus einem Linienspektrum lesen Forscher die Fingerabdrücke der einzelnen Elemente, ähnlich der Spurensicherung an einem Tatort. Auf diese Weise entschlüsseln sie nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern auch den physikalischen Zustand des Gases wie Dichte, Temperatur und Masse. Diese Werte hängen miteinander zusammen. Beispielsweise bewegen sich die Teilchen bei hohen Temperaturen mit großen Geschwindigkeiten. Damit ein Halo dennoch stabil bleibt, braucht es viel Masse, die mit ihren starken Schwerkraftfesseln das Gasgespinst in Zaum hält.

Apropos Masse: Hans Böhringer und seine Kollegen bestätigen den Befund Fritz Zwickys: Der größte Anteil des Materials in Galaxienhaufen konzentriert sich in der Dunklen Materie. Die Werte liegen weit über denen im gesamten Universum. „Ganze 87 Prozent macht die Dunkle Materie im Comahaufen aus, elf Prozent stecken im Gashalo und lediglich zwei Prozent in den sichtbaren Galaxien", sagt Böhringer.

FORSCHER ENTLARVEN UNBEKANNTE RÖNTGENQUELLEN

Der Coma- oder der 65 Millionen Lichtjahre entfernte Virgohaufen entpuppen sich als ideale Studienobjekte, zumal sie vergleichsweise nah und schon lange bekannt sind. Wie oben erwähnt, hat *Rosat* jedoch an die 2000 weitere Galaxienhaufen aufgespürt, deren Halos offensichtlich als helle Röntgenquellen aufscheinen. Doch woher wissen die Astronomen, dass hinter diesen Quellen tatsächlich Galaxienhaufen sitzen?

Zunächst studiert Böhringer die bestehenden Kataloge von Röntgenhaufen und sucht in Verzeichnissen, die mit optischen Teleskopen erstellt wurden. Zeigen die Bilder mehrere verdächtige Objekte – sprich Galaxien – „auf einem Haufen", nimmt der Astronom die Spektren und leitet daraus jeweils die Entfernungen ab. Das geschieht über die kosmische Rotverschiebung: Die Expansion des Weltalls zieht die Wellen der im Raum eingebetteten Objekte auseinander und verschiebt sie in den roten Spektralbereich. Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso schneller flieht sie vor uns, und umso höher ist der Wert der Rotverschiebung z.

Der Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung ist bei sehr hohen z-Werten jedoch kompliziert und wird vom jeweils verwendeten kosmologischen Modell bestimmt. Die Astronomen sprechen daher lieber von „Rückblickzeit" – jenem Alter, das

ein Objekt hatte, als sein Licht auf die Reise ging. In jedem Fall bedeuten identische z-Werte dasselbe Alter und dieselbe Distanz. Stimmen sie bei den erwähnten verdächtigen Galaxien überein, gibt es daher kaum Zweifel, dass sie alle zu ein und demselben Haufen gehören.

Auf diese Weise erstellen die Forscher am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik zwei Kataloge: *Noras II* enthält 934 Galaxienhaufen am Nordhimmel, *Reflex II* umfasst 919 Haufen am südlichen Firmament. Das große Datenmaterial bedeutet für Hans Böhringer viel Arbeit – aber in einem überraschend anderen Sinn, als man zunächst erwartet.

Der Wissenschaftler führt den Besucher aus seinem Zimmer durch ein Labyrinth von Gängen und Treppen in einen langen Flur, an dessen einer Wand ein hasenstallgroßer Holzkasten steht. Die Front ist mit einer Glasscheibe versehen. Böhringer knipst das Licht an, und in dem Kasten leuchten Hunderte orangefarbener Kreise auf. Sie scheinen frei im Raum zu schweben. „Hier sehen Sie ungefähr 900 Galaxienhaufen, exakt angeordnet an ihren wirklichen Positionen im Weltall“, sagt Böhringer. Die Galaxienhaufen sind Klebepunkte aus dem Kaufhaus.

„Es gibt drei Größen, entsprechend ihrer absoluten Leuchtkraft.“ Befestigt sind die Punkte an 38 parallel hintereinander aufgestellten Platten aus Antireflexglas. Die papiernen Galaxienhaufen hat der Forscher mit fluoreszierender Farbe angepinselt, UV-Lampen beleuchten sie. „Wenn ich irgendwann Zeit habe, muss ich noch mal 900 Punkte kleben“, sagt Böhringer. Der Inhalt soll dem aktuellen Stand von *Noras II* und *Reflex II* angepasst werden, der gut 1800 Röntgenhaufen umfasst.

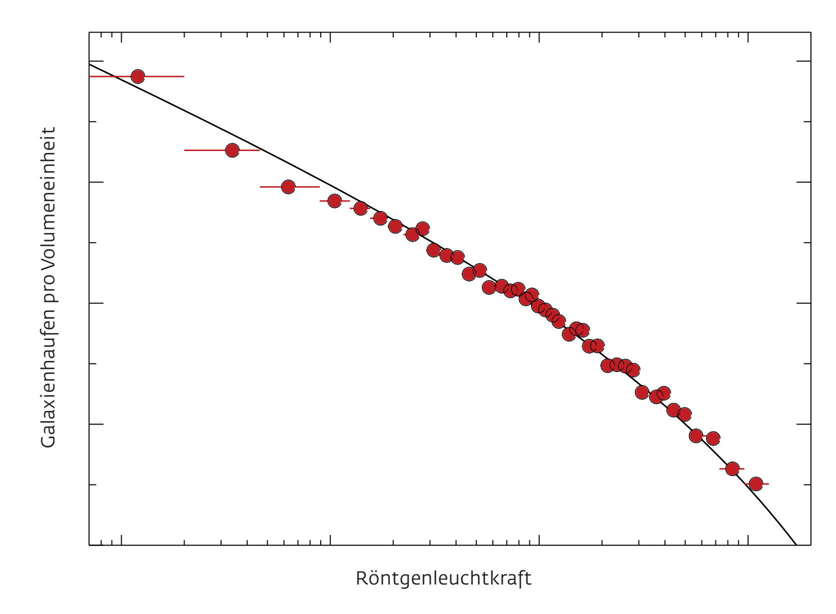


Nah dran: Die Objekte seiner Forschungen stellt Hans Böhringer im Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik aus – in Form eines Schaukastens, den er mit 900 Galaxienhaufen (orangefarbene Klebepunkte) bestückt hat.

Der Guckkasten ist weit mehr als eine wissenschaftliche Spielerei. Schließlich zeigt er einen naturgetreuen Ausschnitt des Universums – einen Würfel mit vier Milliarden Lichtjahren Kantenlänge. Darin ist jeder Galaxienhaufen nicht nur mit zwei Himmelskoordinaten erfasst – ähnlich wie man die Position eines Orts auf der Erde durch die Angabe von geografischer Länge und Breite exakt bestimmen kann –, sondern auch noch mit seiner Entfernung. Erst dadurch wird die Karte dreidimensional und liefert ein maßstabsgetreues Abbild der natürlichen Verhältnisse.

Auf den ersten Blick sieht selbst der Laie, dass die großräumige Verteilung der Galaxienhaufen keineswegs homogen ist. Vielmehr deuten sich schon auf dieser Skala die anfangs angesprochenen netzförmigen Strukturen an. Um diese kosmische Honigwabe im Detail zu untersuchen, nutzen die Astronomen mehrere Methoden.

„Ein wichtiges Instrument ist das Massenspektrum“, sagt Hans Böhringer. Das hat mit einem klassischen Spektrum nichts zu tun, bei dem ein Prisma oder ein Gitter das Licht eines Objekts in einen Regenbogen zerlegt. Ein Massenspektrum gibt Auskunft darüber, wie sich die Galaxienhaufen



Einfacher Zusammenhang: Das Diagramm zeigt die Leuchtkraftfunktion von Galaxienhaufen, also ihre Anzahl pro Volumeneinheit bei einer bestimmten Röntgenleuchtkraft. Die Grafik verdeutlicht, dass die Haufen mit den höchsten Leuchtkräften und den größten Massen sehr selten sind. Das entspricht der Materieverteilung im jungen All, wo viele kleine und wenige große Fluktuationen existierten.

Foto: Axel Griesch; Grafik: MPI für extraterrestrische Physik



Die Inflation hat winzige Fluktuationen des ursprünglichen Quantenvakuums schlagartig auseinandergezerrt und über den melonengroßen Raum verteilt.

gemäß ihrer Masse verteilen. Anders formuliert: Wie viele Galaxienhaufen einer bestimmten Masse gibt es pro Volumeneinheit?

Um zu verstehen, weshalb Antworten auf diese Frage von grundlegender Bedeutung sind, müssen wir einen Ausflug zu den Wurzeln allen Seins unternehmen. Die meisten Kosmologen, die Geburt und Entwicklung des Universums nachspüren, akzeptieren heute das Modell des inflationären Urknalls. Danach ist das All vor 13,7 Milliarden Jahren aus einem Quantenvakuum hervorgegangen. Im unvorstellbar kurzen Zeitraum von 10^{-34} bis 10^{-32} Sekunden nach dem Urknall soll sich der Kosmos mit Überlichtgeschwindigkeit um 30 Größenordnungen aufgebläht haben, von der Planck-Länge (10^{-35} Meter) bis zum Durchmesser einer Melone.

NACH DEM URKNALL GEHT DIE KOSMISCHE SAAT AUF

Diese Inflation hat das All nicht nur extrem geglättet, sondern auch winzige Fluktuationen des ursprünglichen Quantenvakuums schlagartig auseinandergezerrt und über den nun melonengroßen Raum verteilt. Weil der Kosmos weiter expandierte – und noch heute expandiert –, wuchsen auch die anfänglichen (primordialen) Dichtefluktuationen. Wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall entwickelten sich daraus großräumige Strukturen in Form netzartiger Filamente: die Keimzellen von Galaxienhaufen, Galaxien und Sternen.

Um die Masse eines Haufens zu bestimmen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei einer Methode ermitteln die Forscher lediglich seine Röntgenleuchtkraft. Zuvor müssen sie viele Galaxienhaufen vermessen und eine Menge an statistischen Störeffekten berücksichtigen. Und sie müssen die eine oder andere Masse mit einem unabhängigen Verfahren herausfinden, etwa mithilfe einer Gravitationslinse (MaxPlanckFor-

NEUER RÖNTGENSPÄHER AM START

Die Röntgenastronomen sind gespannt: Im Jahr 2014 soll der russische Satellit *Spektrum-Röntgen-Gamma* (SRG) von Baikonur aus starten. Das Hauptinstrument an Bord heißt *eRosita* und soll mit bisher unerreichter spektraler und räumlicher Auflösung die erste vollständige Himmelsdurchmusterung im mittleren Röntgenbereich bis zehn Kiloelektronenvolt vornehmen.

eRosita wird den dunklen Seiten des Universums nachspüren, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie. Bei Letzterer könnte es sich um die Vakuumenergie handeln, die der Kosmologischen Konstante in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie entspricht; es könnte aber auch ein zeitvariables Energiefeld sein. Die Lösung dieser Frage wird eine fundamentale Rolle für die Physik spielen.

Die wissenschaftlichen Hauptziele der Mission:

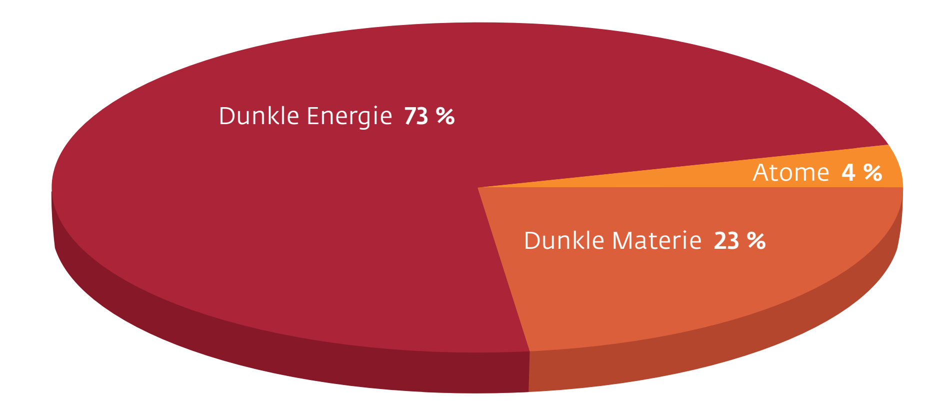
- Die Beobachtung des heißen intergalaktischen Mediums von 50 000 bis 100 000 Galaxienhaufen und Galaxiengruppen und ihrer Gashalos, mit denen sie sich im Röntgenbild zu erkennen geben. Damit wollen Forscher die großräumigen Strukturen des Universums kartografieren und deren Entwicklung studieren.
- Die systematische Untersuchung aller schwarzen Löcher in nahen Galaxien und vieler neuer (bis zu drei Millionen), weit entfernter aktiver galaktischer Kerne.
- Die detaillierte Untersuchung der Physik von Röntgenquellen in unserer Galaxie, wie Supernovaüberreste, Röntgendoppelsternsysteme und Vorhauptreihensterne.

Das *eRosita*-Teleskop besteht aus sieben identischen Spiegelmodulen. Um die geforderte Sensitivität zu erreichen, enthält jedes Modul 54 ineinander verschachtelte Spiegelschalen, die ein Team um Peter Predehl am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelt hat. Wissenschaftler um Lothar Strüder haben im Münchner Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft die Kameras entworfen.



Spion im Reich der Finsternis: das Röntgenobservatorium *eRosita*.

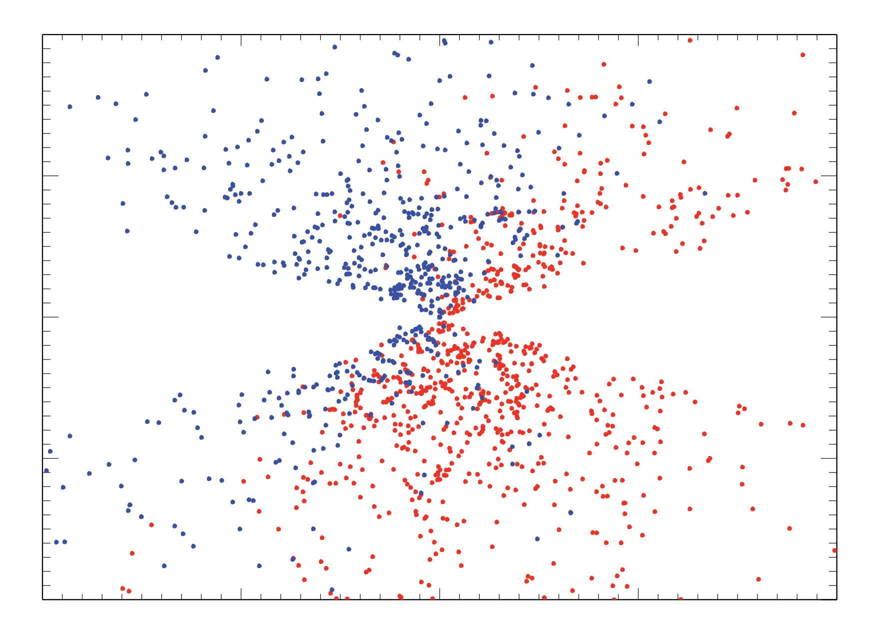
Foto: MPI für extraterrestrische Physik



Unbekannter Stoff: Beobachtungen deuten darauf hin, dass ungefähr 96 Prozent des Universums unsichtbar sind. Die baryonische Materie, aus der Menschen, Planeten, Sterne oder Galaxien bestehen, macht nur ganze vier Prozent der Masse aus.

schung 4/2010, Seite 56 ff.). Am Ende steht ein Diagramm, das auf der y-Achse die Leuchtkräfte und auf der x-Achse die Massen angibt. Durch die Messpunkte läuft eine Kurve. Trägt man darauf die neu ermittelte Leuchtkraft eines Galaxienhaufens ein, ergibt sich sofort dessen Masse. Diese ist umso größer, je kräftiger der Haufen im Röntgenlicht leuchtet.

Mithilfe eines solchen Massenspektrums veranstalten Hans Böhringer und seine Kollegen eine kosmische Volkszählung. Wie bei irdischen Erhebungen interessiert sie nicht nur das Ergebnis für einen bestimmten Zeitpunkt. So nehmen Regierungen immer wieder Volkszählungen vor und vergleichen die Ergebnisse miteinander. Dabei gewinnen sie wertvolle Einblicke in die demografische Entwicklung ihres Landes. „Wenn wir Astronomen die Zahl der Galaxienhaufen pro Volumeneinheit für unterschiedliche Epochen bestimmen, erhalten wir Einblick in die Evolution des Universums“, sagt Böhringer.



Kosmisches Muster: Aus Daten des Röntgensatelliten *Rosat* haben Forscher eine dreidimensionale Karte der Galaxienhaufen erstellt. Zusätzlich zu den Positionen am Himmel gaben sie für jeden Haufen die Rotverschiebung als Maß der Entfernung an und verliehen der Grafik dadurch Tiefe. Die unterschiedlichen Farben rühren von verschiedenen Durchmusterungen her; aus den Regionen ohne Punkte liegen keine Daten vor. Selbst ohne aufwendige statistische Auswertungsverfahren zeigt sich, dass die Haufen dazu tendieren, Ketten oder Klumpen zu bilden.

Nach dem Urknall ist das Weltall gewachsen und hat sich entfaltet, vom Einfachen zum Komplexen, von den anfangs winzigen Fluktuationen hin zu den großen Strukturen. Demnach sollte etwa die Anzahl der Galaxienhaufen im Laufe der Zeit schwanken. Und weil deren Verteilung und Dichte wiederum von den kosmologischen Modellen abhängen, werden Böhringers Beobachtungen zum Prüfstein für die Theorie.

DAS UNIVERSUM ALS GEORDNETES EXPERIMENT

Wie ein Demograf die Bevölkerung nach allen Regeln statistischer Kunst untersucht, wendet der Max-Planck-Forscher raffinierte mathematische Methoden wie das Leistungsspektrum an, um die Verteilung der Galaxienhaufen zu ermitteln. „Es zeigt sich, dass die Chance, einen Galaxienhaufen zu finden, in der Nähe eines anderen Haufens größer ist als an einem beliebigen Punkt“, sagt Böhringer über das Ergebnis. Mit anderen Worten: „Die Verteilung der Haufen ist geklumpt.“ Und das gilt ebenso für die Dunkle Materie. Die nämlich muss nach dem Verständnis der Wissenschaftler hinter den Galaxienhaufen stecken – wie eine unbeleuchtete Großstadt auf dem Satellitenfoto der Erde. Erst wenn man die Lichter anknipst, werden die Umrisse der Stadt sichtbar.

Nun kommen Simulationen ins Spiel: Den Kosmologen gelingt es heute, die Evolution des Alls mithilfe von Supercomputern nachzustellen. Dazu reichen letztlich sechs Parameter aus, etwa der Wert, mit dem das All expandiert (Hubble-Konstante), oder die Dichte der Dunklen Energie, in der offenbar 73 Prozent des Universums stecken; diese Dunkle Energie treibt das All beschleunigt auseinander. Die Wissenschaftler füttern ihr Elektronenhirn also mit einem halben Dutzend Zutaten, starten kurz nach dem Urknall und lassen es dann Millionen und Milliarden Jahre in die Zukunft rechnen.

Bei diesen Simulationen entstehen großräumige Strukturen, die von den anfangs eingegebenen Parametern abhängen. „Variiert man diese Parameter, ändern sich auch die Strukturen“, sagt Hans Böhringer. „Das Ganze läuft als

Grafik: designergold (oben), MPI für extraterrestrische Physik (unten)

sauberes, geordnetes Experiment ab." Auf diese Weise lässt sich zurückverfolgen, welche Anfangsbedingungen im ganz jungen Kosmos geherrscht und welche Parameter welche Werte gehabt haben müssen.

Ein brauchbares kosmologisches Modell liefert naturgemäß eine enge Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung. Und da schneidet das geschilderte Szenario des inflationären Urknalls gar nicht schlecht ab. Auch die vermuteten Anteile von Dunkler Energie (73 Prozent) und Dunkler Materie (23 Prozent) an der gesamten Energiedichte des Universums scheinen recht gut zu passen – in der „normalen" baryonischen Materie stecken offenbar nur vier Prozent. Dennoch sind noch viele Fragen offen. Hans Böhringer schreckt das nicht, im Gegenteil: „Am interessantesten wäre es doch, wenn wir irgendetwas Überraschendes entdecken würden." ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Galaxienhaufen sind die größten Gebilde im Universum. Die meisten stecken in einer heißen Gashülle; dieser Halo zeigt sich im Röntgenlicht.**
- **Aus der Untersuchung der Röntgenhalos schließen Astronomen auf die Bestandteile des Gases und auf die Gesamtmasse der Galaxienhaufen. Die unbekannte Dunkle Materie macht mehr als 80 Prozent der Masse eines Haufens aus.**
- **Weil Galaxienhaufen die großräumigen Strukturen nachzeichnen, sind sie wertvolle Indikatoren für die Verteilung der Materie im Universum. Außerdem dienen sie dazu, kosmologische Modelle zu überprüfen.**

GLOSSAR

Baryonische Materie: Allgemein versteht man darunter jene Materie, die wir kennen und aus der die sichtbare Welt besteht. Im engeren Sinne sind Baryonen Teilchen, die sich aus drei Quarks zusammensetzen, also etwa Protonen. Man unterscheidet auch noch zwischen Leptonen (etwa Elektronen) oder instabilen Mesonen (Quark-Antiquark-Paare).

Plasma: Elektrisch leitendes Gas, das vollständig aus freien Ladungsträgern besteht, also aus Ionen und Elektronen. Die Ionen sind Atome, die entweder mehr oder weniger Elektronen haben als im Normalzustand. 99 Prozent der baryonischen Materie im Weltall liegen als Plasma vor.

Supernova: Hat ein Stern am Ende seines Lebens mehr als acht Sonnenmassen und ist die innere Energiequelle (Kernfusion) versiegt, dann kann der nach außen wirkende Strahlungsdruck der Schwerkraft nicht länger widerstehen: Die Kugel kollabiert, und der Stern zerbirst. Bei einer anderen Art von Supernova explodiert ein kleiner, ausgebrannter Stern (Weißer Zwerg), weil er von einem größeren mit Materie gefüttert wird und schließlich unter dieser übermäßigen Nahrungsaufnahme zusammenbricht.

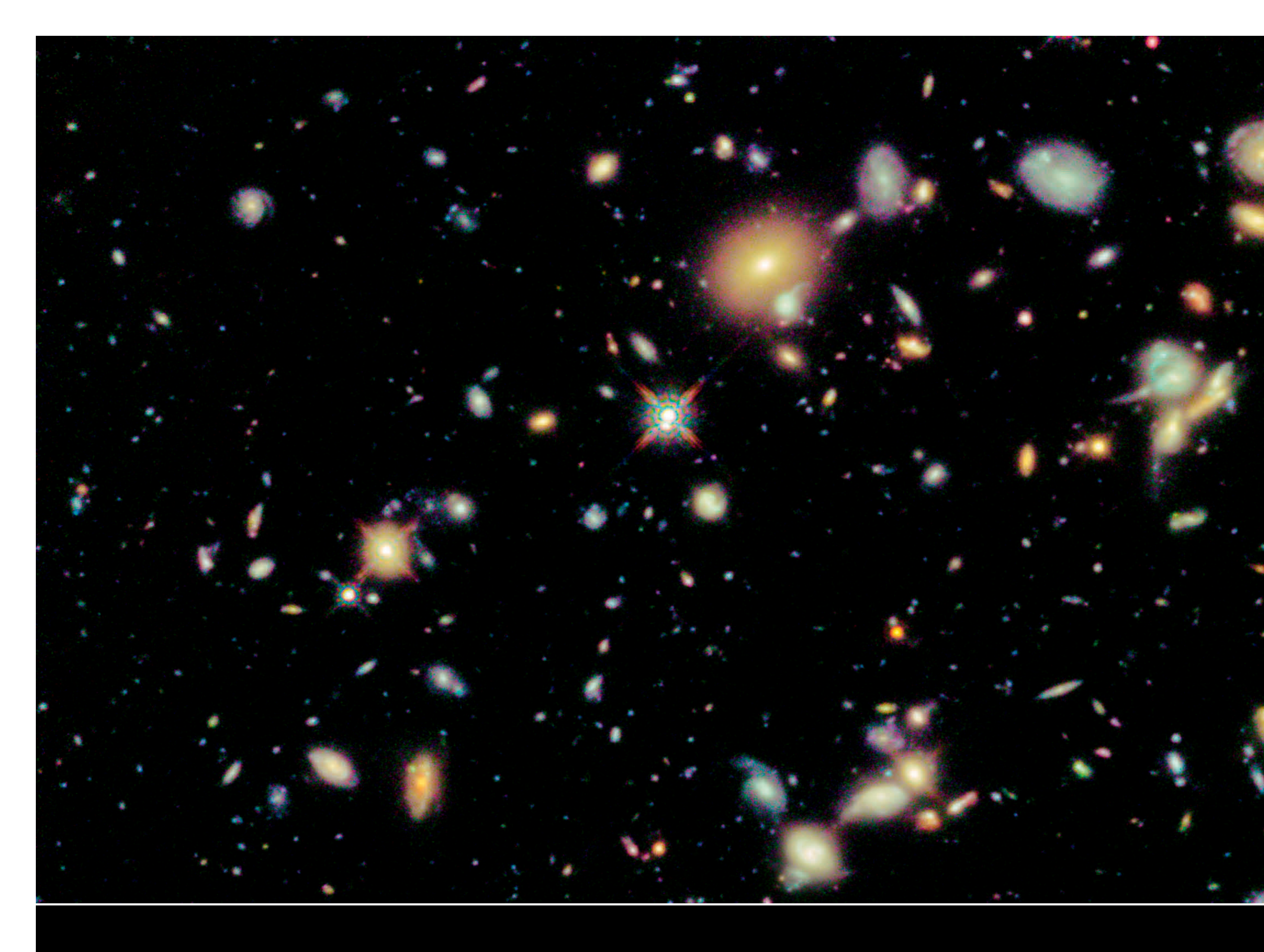


Steckt in Ihnen eine Geschäftsidee? Worauf warten Sie noch? Mit dem Gründungswettbewerb start2grow 2013 bringen Sie Ihren Businessplan in Höchstform.

Bundesweiter Wettbewerb:
- Kostenfreie Teilnahme
- Hohe Geld- und Sachpreise
- Netzwerk mit mehr als 600 Coaches
- Alle Branchen plus Sonderdisziplin „Technologie"



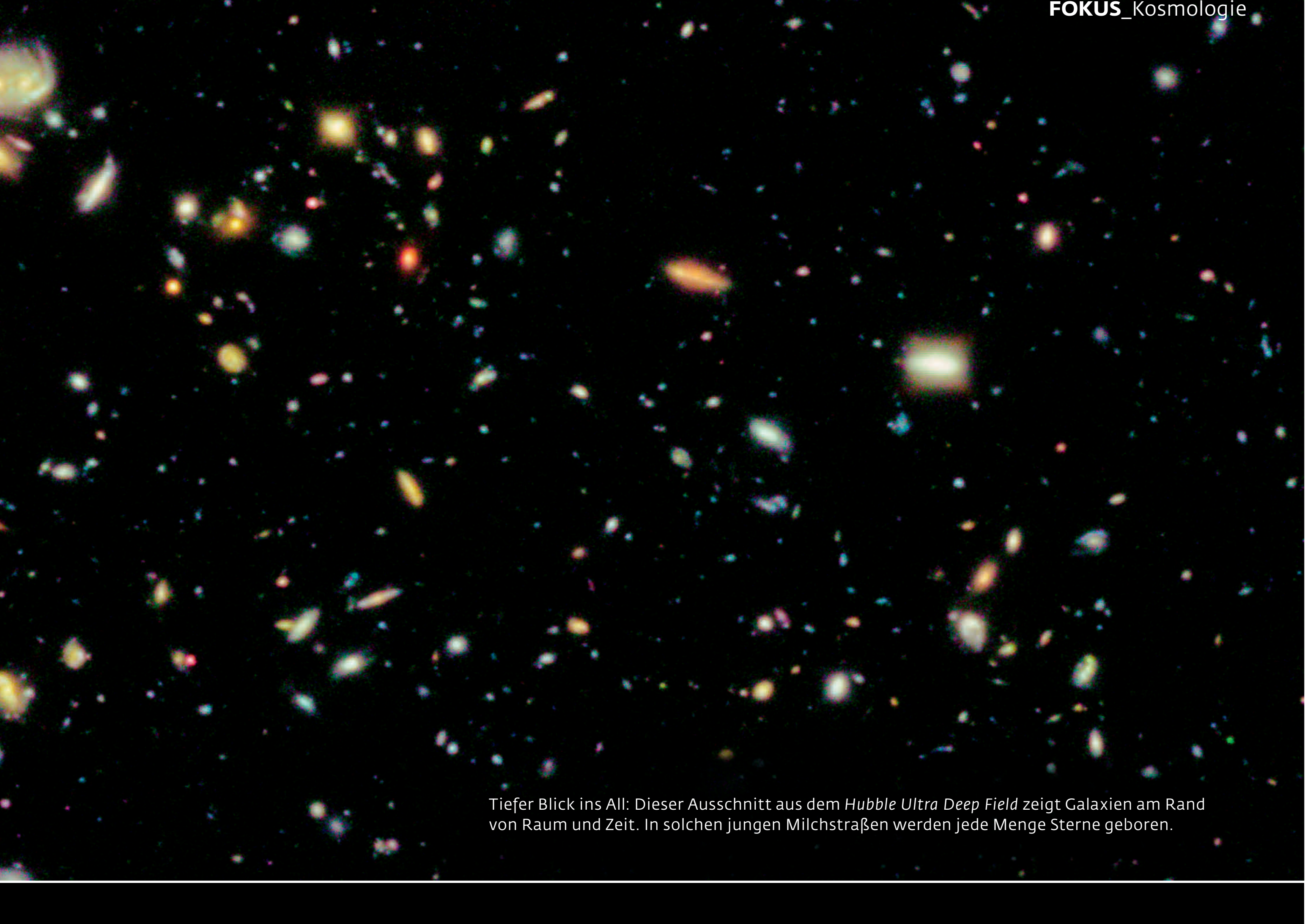
Los geht´s ab 26. November 2012. Jetzt anmelden: www.start2grow.de



Sternfabriken am Ende der Welt

Als das All vor 13,7 Milliarden Jahren auf die Welt kam, gab es zunächst nur Strahlung. Doch wenige Hundert Millionen Jahre später war der Raum erfüllt mit Galaxien – ungemein produktiven Sternfabriken, die nicht so recht ins Bild einer allmählichen kosmischen Evolution passen. Forscher wie **Fabian Walter** vom Heidelberger **Max-Planck-Institut für Astronomie** versuchen, Licht in die dunkle Epoche des Universums zu bringen.

TEXT **ALEXANDER STIRN**



Tiefer Blick ins All: Dieser Ausschnitt aus dem *Hubble Ultra Deep Field* zeigt Galaxien am Rand von Raum und Zeit. In solchen jungen Milchstraßen werden jede Menge Sterne geboren.

Foto: NASA, ESA, R. Ellis (Caltech) and the HUDF 2012 Team

Griffige Bezeichnungen für eigentlich unbegreifliche Vorgänge zu finden hat Astronomen noch nie vor ein Problem gestellt: *Dark Ages*, das dunkle Zeitalter, nennen sie etwa jene Ära, die knapp 380 000 Jahre nach der Geburt des Universums beginnt. Zu dieser Zeit machen sich die positiv geladenen Ionen aus dem Urknall gerade daran, frei umherschwirrende Elektronen einzufangen – das Nachleuchten des Big Bangs verfliegt. Noch haben sich allerdings keine Sterne gebildet, die Licht in die plötzliche Dunkelheit bringen könnten.

Nicht nur kosmologisch ist das ferne Zeitalter eine dunkle Periode. Auch die Wissenschaft tut sich bisher schwer, die damaligen Vorgänge zu erhellen: Beobachtungen rund um die Geburt der ersten Sterne gibt es so gut wie keine. Die Forscher sind daher auf Simulationen und theoretische Überlegungen angewiesen.

Langsam ändert sich das jedoch. „Da unsere Teleskope immer besser und immer empfindlicher werden, sehen wir heute Dinge, die wir vor zehn Jahren nicht hätten beobachten können", sagt Fabian Walter, Astronom am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie. Dort untersucht der 41-Jährige, wie und wann die ersten Sterne entstanden sind, wie produktiv die frühen Galaxien waren und wo genau die stellaren Kinderstuben lagen.

Ein ums andere Mal stellen er und seine Kollegen die Theoretiker dabei vor ungeahnte Probleme – und das dürfte so weitergehen. Walter sagt: „Das Studium von Galaxien in der Frühphase des Universums wird sich in den kommenden Jahren zu einem zentralen Forschungsgebiet für Astronomen entwickeln."

Noch ist es eine Detektivarbeit – eine mühsame Suche, die so gar nichts mit den bunten Bildern zu tun hat, welche die Astronomie sonst produziert. Im Treppenhaus des Heidelberger Instituts, ein Betonbau auf dem Königstuhl hoch über der Stadt, hängen viele dieser typischen, farbenfrohen Aufnahmen. Sie zeigen planetarische Nebel, Sternhaufen, Spiralgalaxien. Zwischen all den Hinguckern hängt auch eine unscheinbare Aufnahme, hauptsächlich schwarz, mit vielen pixeligen Farbklecksen. *Hubble Ultra Deep Field* steht darunter.

Es ist ein Blick in die tiefsten Tiefen des Alls. Viele Hundert Stunden lang hat das Weltraumteleskop *Hubble* seine



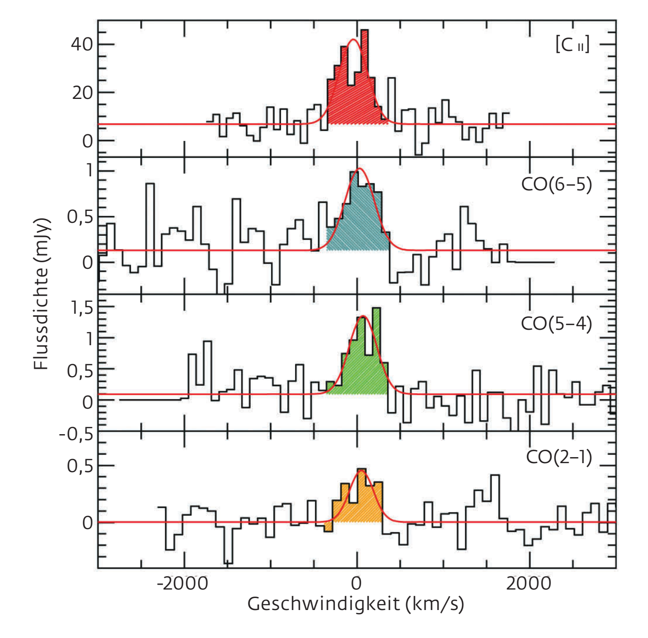
Vor allem molekularer Wasserstoff ist nötig, damit ein Stern geboren werden kann. Er lässt sich allerdings nicht direkt beobachten.

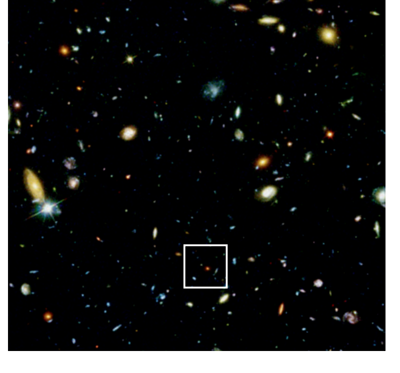
Augen auf eine Region des Himmels gerichtet, die auf einem Daumennagel am ausgestreckten Arm nur einen Quadratmillimeter groß wäre. Selbst extrem alte, extrem schwach leuchtende Objekte sind darauf noch auszumachen. „Manche dieser Galaxienbilder setzen sich lediglich aus ein paar Hundert Photonen zusammen", sagt Walter und deutet auf einen rötlich schimmernden Fleck.

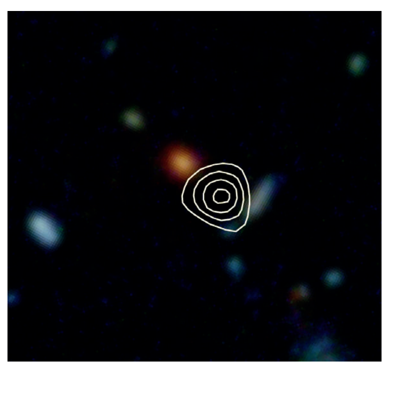
Die Farbe ist kein Zufall: Seit dem Urknall hat sich das Universum immer weiter ausgedehnt. Dabei wurden auch die Photonen, die Teilchen des Lichts, gestreckt. Ihre Wellenlänge hat sich zwangsläufig vergrößert – und zwar umso mehr, je weiter das Objekt, das sie einst ausgesandt hat, von der Erde entfernt war. Rotverschiebung nennen Astronomen diesen Effekt. Sein Ausmaß wird durch den „z-Wert" beschrieben: Bei z = 1 ist die Wellenlänge doppelt so groß wie bei einem ruhenden Objekt, bei einem Wert von zwei hat sie sich verdreifacht und so weiter. Da Astronomen ferne Objekte stets zu jenem Zeitpunkt sehen, an dem sich das Licht auf den Weg gemacht hat, dient die Rotverschiebung zudem als Maß für das Alter einer Galaxie. Das Licht eines Objekts mit z = 10 etwa ging auf die Reise, als das Universum gerade einmal 500 Millionen Jahre alt war. Bei einem angenommenen Weltalter von rund 13,7 Milliarden Jahren war es also 13,2 Milliarden Jahre lang unterwegs.

„Durch die Rotverschiebung werden weit entfernte Objekte schnell dramatisch dunkel – ganz besonders im Bereich des sichtbaren Lichts", sagt Fabian Walter. Für das Licht der Galaxien, wie es im *Hubble Deep Field* (HDF) zu sehen ist, interessiert sich der Heidelberger Astronom aber ohnehin nur am Rande. Es stammt größtenteils von fertigen Sternen. Die Geburt neuer Sonnen geschieht woanders – im Innern dichter Wolken aus Staub und Gas. „Ohne Gas keine Sterne", sagt Walter.

Vor allem molekularer Wasserstoff ist nötig, damit der stellare Nachwuchs geboren werden kann. Er lässt sich allerdings nicht direkt beobachten. Das geht nur über den Umweg eines anderen, eng mit dem Wasserstoffvorrat verbundenen Gases: Kohlenmonoxid. Sein Molekül sendet ein charakteristisches Signal aus, das normalerweise im infraroten Bereich des Spektrums liegt.



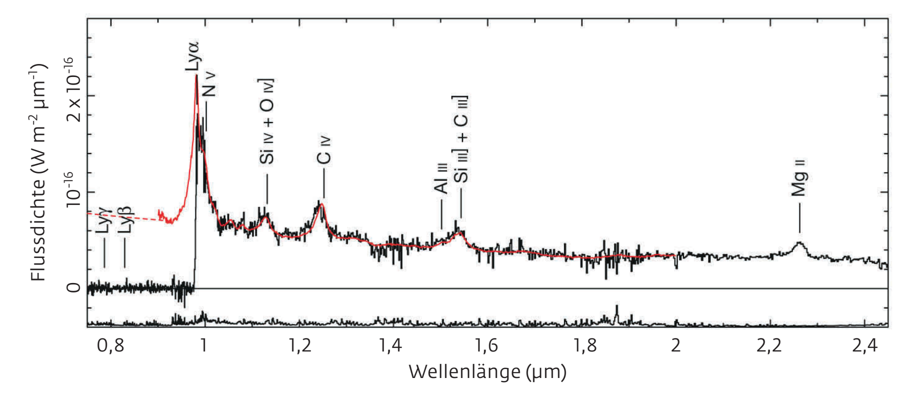




Eine Galaxie taucht auf: Das Objekt HDF850.1 ist auf dem Ausschnitt des *Hubble Deep Field* (Foto links) gar nicht zu sehen. Im Bereich der Submillimeterwellen dagegen wird die ferne Milchstraße sichtbar (helle Konturlinien, Foto rechts). Das Licht von HDF850.1 war 12,5 Milliarden Jahre zu uns unterwegs und ist extrem schwach. Dennoch gelang es Astronomen um Fabian Walter, die Strahlung der Galaxie zu analysieren. Die Spektren (links) zeigen charakteristische Linien des Kohlenstoffs, die auf eine hohe Geburtenrate von Sternen hindeuten.

Grafik: Nature 2012; Fotos: STScI / NASA, F. Walter (MPIA), Nature 2012

Wegen der Rotverschiebung kommt es auf der Erde mit Wellenlängen von einigen Millimetern an – also knapp unterhalb des Bereichs der Mikrowellen. Zumindest die hellsten dieser uralten Sternentstehungsgebiete können somit von modernen Millimeterteleskopen wie dem Observatorium des Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) in den französischen Alpen ausfindig gemacht werden (siehe Kasten auf Seite 31).



Schlüssel zur frühen Entwicklungsphase des Universums: Quasare gehören zu den ersten Objekten, die sich wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall gebildet haben. Im Herz dieser jungen Galaxien sitzen gigantische schwarze Löcher, die Materie in Form von Jets ins All blasen (Illustration oben). Die Spektren dieser Objekte verraten viel über deren Innenleben, insbesondere über Prozesse der Sternentstehung. Hier das Spektrum des Rekordhalters (z=7,1), das genauso aussieht wie das eines Quasars in Erdnähe.

Grafik: ESO – M. Kornmesser (oben), Nature 2011 (unten)

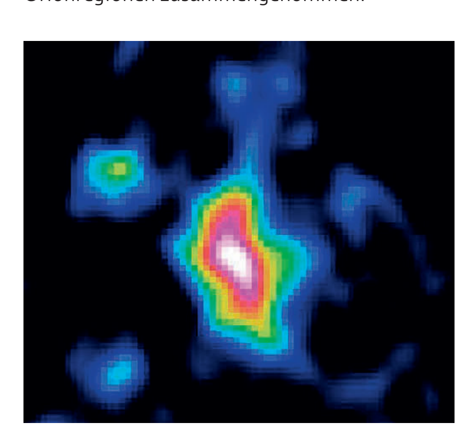
EIN SCHWARZER FLECK AUF SCHWARZEM HINTERGRUND

Mit ihrer Hilfe haben Astronomen in den vergangenen Jahren eine ganze Reihe solcher Quellen entdeckt. Eine der wichtigsten heißt schlicht HDF850.1. Im klassischen *Hubble Deep Field* ist die Galaxie nicht mehr als ein schwarzer Fleck auf schwarzem Hintergrund. Im Submillimeterlicht leuchtet sie jedoch stark auf. Besonders deutlich sind dabei Kohlenmonoxid-Moleküle auszumachen, die einst Strahlung absorbiert, in Rotationsschwingungen umgesetzt und schließlich bei klar definierten Frequenzen (Spektrallinien) abgegeben haben.

Damit ist es Fabian Walter im Jahr 2012 zusammen mit Forschern des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn und weiteren Kollegen gelungen, die Rotverschiebung von HDF850.1 zu bestimmen. Sie liegt bei einem z-Wert von 5,2. Das Licht der Galaxie war demnach 12,5 Milliarden Jahre zur Erde unterwegs und erlaubt Einblick in eine Zeit, als das Universum gerade einmal 1,2 Milliarden Jahre alt war.

Die Studie, veröffentlicht in der Fachzeitschrift NATURE, offenbart aber noch mehr: Charakteristische Spektrallinien des Kohlenstoffs – insbesondere von Atomen, denen ein Elektron fehlt

Im Kreißsaal der Sonnen: Der Orionnebel (oben) gehört zu den malerischen Motiven am Firmament. Schon mit bloßem Auge lässt sich im Schwertgehänge der Figur ein blasses Fleckchen erkennen. Das Teleskop enthüllt eine prachtvolle Wolke aus Gas und Staub, in der Sterne geboren werden. In der Region Orion-KL (schwarzes Rechteck) des rund 1350 Lichtjahre entfernten Gebildes ist die Geburtenrate der Sterne ähnlich hoch wie in der Galaxie J1148+5251 (unten) – allerdings bezogen auf ein ungleich größeres Volumen. Denn diese ferne Sternfabrik im jungen All ist so groß wie hundert Millionen Orionregionen zusammengenommen.



– deuten auf eine hohe stellare Aktivität hin. Sie verraten dabei nicht nur, dass tief in der fernen Milchstraße, versteckt hinter dicken Wolken aus Staub und Gas, neue Sterne produziert werden; sie geben auch Anhaltspunkte für den Ablauf dieses Prozesses.

GALAXIE MIT ERSTAUNLICH HOHER GEBURTENRATE

Demnach produziert eine Galaxie wie HDF850.1 eine Billion Mal so viel Energie wie unsere Sonne. Das ist nur möglich, wenn dort Jahr für Jahr Sterne im Ausmaß von etwa tausend Sonnenmassen entstehen. Eine normale Galaxie wie unsere Milchstraße dagegen bringt es lediglich auf ein Tausendstel dieser Menge. „Bereits kurz nach dem Urknall müssen somit Galaxien existiert haben, die irrsinnig viele Sterne produzieren konnten", sagt Fabian Walter.

Das widerspricht allerdings gängigen Modellen, nach denen die ersten Sterne und Galaxien eher gemächlich entstanden sein sollen: So waren Theoretiker bisher davon ausgegangen, dass die Elemente, die im Urknall gebildet wurden, viele Hunderttausend Jahre brauchten, um sich langsam zusammenzuballen – unterstützt von einer Kraft, die Astronomen Dunkle Materie nennen und über deren Natur sie noch kaum etwas sagen können. Die gasförmigen Elemente – vor allem Wasserstoff, Helium und Lithium – sammelten sich in den Scheiben der ersten Galaxien, verdichteten sich unter dem Einfluss der gegenseitigen Schwerkraft und begannen zu kollabieren. Irgendwann waren die Molekülwolken schließlich dicht genug, um das Feuer der Kernfusion zu zünden.

Diese ersten Sonnen, Theoretiker sprechen von Population-III-Sternen, müssen gewaltig gewesen sein. Sie brannten aus, explodierten und schleuderten dabei die schwereren Elemente, die sie während der Kernfusion produziert hatten, hinaus ins All. Nach und nach entstanden auf diese Weise die

Fotos: NASA, ESA, Robberto (STScI/ESA), Orion Treasury Project Team (oben), NRAO/AUI/NSF (unten)



Galaxien wie HDF850.1 sind nicht die einzige Gefahr für die derzeitigen Modelle des frühen Universums. Überraschende Daten kommen auch von Quasaren.

Bausteine, aus denen die heutigen Sterne und Galaxien bestehen. Eigentlich ein langsamer, kontinuierlicher Prozess.

Dass eine Milliarde Jahre nach dem Urknall bereits riesige Sternfabriken wie in HDF850.1 existiert haben müssen, passt nicht so recht in dieses Bild. „In vielen Bereichen der Astronomie kommt man heute dahinter, dass am Anfang des Universums einige Dinge sehr viel schneller abgelaufen sein müssen als gedacht“, sagt Walter zu diesem Dilemma zwischen Theorie und Praxis.

Noch reichen die Beobachtungsdaten nicht für ein abschließendes Urteil. Gut möglich, dass Fabian Walter bei seiner Suche nach besonders weit entfernten Galaxien ausgerechnet jene erwischt hat, die am hellsten und aktivsten sind – und deshalb auch am einfachsten zu beobachten. Vielleicht handelt es sich bei ihnen um Ausreißer, vielleicht um Glückstreffer. Möglicherweise erlauben sie keinen Rückschluss auf die wahren Verhältnisse in den Jugendjahren des Universums. „Wenn wir ehrlich sind, dann haben wir keine Ahnung, wie viele derartige Objekte es gibt, wir haben ja bisher nur eines genauer untersucht“, so Fabian Walter. „Sollten davon allerdings Tausende existieren, dann haben die Theoretiker mit ihren Simulationen ein Problem.“

Galaxien wie HDF850.1 sind nicht die einzige Gefahr für die derzeitigen Modelle des frühen Universums. Überraschende Daten kommen auch von Quasaren – aktiven schwarzen Löchern, die im Zentrum der meisten Galaxien sitzen und fortwährend Materie anziehen. Gas und Staub werden von ihnen auf Spiralbahnen gezwungen, beschleunigt und stark erhitzt. Kurz bevor die

DAS IRAM-INTERFEROMETER

In den französischen Alpen, auf dem 2550 Meter hoch gelegenen Plateau de Bure, steht eines der leistungsfähigsten Teleskope für Millimeterstrahlung: das Observatorium des Institut de Radioastronomie Millimétrique, kurz IRAM. In dem deutsch-französisch-spanischen Gemeinschaftsprojekt sind sechs Radioteleskope, die jeweils einen Durchmesser von fünfzehn Metern haben, zu einem sogenannten Interferometer zusammengeschaltet (Foto).

Dabei empfängt jede einzelne Teleskopschüssel – aufgrund ihres individuellen Standorts – die Radiowellen aus den Tiefen des Alls zu einem leicht unterschiedlichen Zeitpunkt. Die Signale werden anschließend überlagert, Algorithmen errechnen aus den Differenzen ein hochaufgelöstes Bild des beobachteten Objekts. Astronomen können dadurch tiefer und schärfer ins All blicken, als das mit einem einzelnen Teleskop möglich wäre. Bis zum Jahr 2018 soll das Observatorium auf dem Plateau de Bure, das auf deutscher Seite von der Max-Planck-Gesellschaft getragen wird, modernisiert und auf zwölf Teleskope erweitert werden.



Foto: IRAM – Rebus


In Chile entsteht derzeit ALMA, ein Millimeterteleskop der Superlative. Die Anlage wird fünfzig Antennen umfassen.

Materie in dem kosmischen Schlund verschwindet, leuchtet sie hell auf.

Quasare gehören damit zu den lichtstärksten Objekten im All. „Das macht sie zu einem idealen Forschungsgegenstand, um physikalische Prozesse und die chemische Zusammensetzung in weit entfernten Regionen zu studieren", sagt Walter. Selbst mit IRAM reicht eine Beobachtungszeit von einigen Stunden, um den Quasaren ihre Geheimnisse zu entlocken.

TELESKOP DURCHLEUCHTET DIE JUGEND DES ALLS

Einen großen Nachteil haben die hell leuchtenden Objekte allerdings: Sie kommen – zumindest in den Frühzeiten des Universums – extrem selten vor und sind entsprechend schwer zu finden. Walter und seine Kollegen setzen daher auf eine systematische Durchmusterung des Himmels mithilfe eines Teleskops auf Hawaii: Pan-STARRS (*Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System*) durchforstet das gesamte Firmament über der Pazifikinsel automatisch nach Lichtpunkten, deren Signatur mit Quasaren übereinstimmen könnte. „Auf diese Weise haben wir schon zwei Quasare gefunden", sagt Walter. „Das ist nicht großartig, aber es zeigt, dass die Methode funktioniert und wir guten Gewissens weitermachen können."

Ein seit Längerem bekanntes kosmisches Leuchtfeuer heißt J1148+5251. Es gibt Einblicke in eine Zeit, die weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall liegt. Bereits 2009 konnten die Heidelberger und Bonner Astronomen mithilfe von IRAM zeigen, dass auch in dieser Galaxie extrem viele Sterne gebildet werden. Die Rate liegt sogar an der Obergrenze des physikalisch Machbaren – noch mehr Sterne, und die Energie der vielen Geburten würde die Kinderstube mit ihren 5000 Lichtjahren Durchmesser sprengen.

„Solch extreme Verhältnisse finden sich in unserer Milchstraße nur in viel kleineren Regionen, etwa in Teilen des Orionnebels", sagt Walter. J1148+5251 ist jedoch so groß wie hundert Millionen Orionregionen zusammen – und das nicht einmal eine Milliarde Jahre nach der Geburt des Universums.

Auch eine andere Beobachtung, die Walter und seine Kollegen bei Quasaren kurz nach dem Urknall gemacht haben, gibt Rätsel auf: Obwohl die Objekte äußerst jung sind, ist ihr schwarzes Loch bereits ähnlich massiv wie bei heutigen Galaxien. Die dynamische Masse, die sich rundherum verteilt, ist dagegen vergleichsweise gering. Sie beträgt lediglich das Zwanzig- bis Dreißigfache des Zentrums. Bei aktuellen Galaxien ist dieser Wert deutlich höher, er liegt beim etwa Tausendfachen.

Das könnte darauf hindeuten, dass im jungen Universum zunächst die schwarzen Löcher entstanden sind. Sie saugten immer mehr Staub und Gas ab, was letztlich zur Geburt der ersten Sterne in direkter Umgebung des galaktischen Zentrums führte. „Das ist aber sehr spekulativ", warnt Fabian Walter. Daher konzentriere er sich darauf, die Messungen zu machen. Was das alles bedeutet, darüber müssten sich die Kollegen aus der theoretischen Astronomie die Köpfe zerbrechen.

Es ist nicht die einzige Herausforderung, mit der Walter und seine Kollegen die Theoretiker konfrontieren: Das Licht, das die Astronomen von den uralten Quasaren aufgefangen haben, verteilt sich über die verschiedenen Wellenlängen ganz ähnlich wie das Licht heutiger Galaxien. „Da gibt es kaum einen Unterschied zwischen einem Quasar, wie wir ihn 800 Millionen Jahre nach dem Urknall sehen, und einem im gegenwärtigen Universum", sagt Walter.

EINFACHE MESSUNGEN MACHEN MODELLE ZUNICHTE

Das bedeutet aber auch, dass bereits bei den frühen Quasaren die charakteristischen Spektrallinien von Metallen wie Eisen oder Magnesium zu finden sind – Elemente, die nicht im Urknall entstanden sein können, sondern erst nach und nach von den Sternen produziert werden mussten. Eines der gängigen Modelle zur Sternentstehung sagt allerdings voraus, dass Eisen als schwerstes Element lediglich in Sternen gebildet werden konnte, die mindestens zwei Milliarden Jahre alt waren. „Mit einfachen Messungen sind solche Modelle über den Haufen geworfen worden", sagt Walter. Enttäuscht ist er deswegen nicht, im Gegenteil: „Das finde ich faszinierend."

Doch wie schon bei den Galaxien im *Hubble Deep Field* ist die Zahl der untersuchten Quasare noch zu gering, als dass statistisch fundierte Aussagen über die Vorgänge im jungen Universum getroffen werden könnten. Das könnte sich bald ändern: In Chile entsteht derzeit ALMA, ein Millimeterteleskop der Superlative. Statt über sechs Antennen wie IRAM verfügt ALMA über fünfzig; und statt auf einer Höhe von 2550 Metern in den französischen Alpen steht





1 Späher über dem Wolkenmeer: Das Teleskop von Pan-STARRS auf Maui (Hawaii) durchforstet das Firmament nach Lichtpunkten und sucht dabei unter anderem nach den Fingerabdrücken von Quasaren.

2 Unterwegs im Weltall: Der Astronom Fabian Walter hat viele Jahre lang am *Very Large Array* in Socorro (US-Bundesstaat New Mexico) gearbeitet.

es auf mehr als 5000 Metern Höhe in der Atacama-Wüste – einer der trockensten und klarsten Regionen der Erde.

Beim Gedanken daran kommt Fabian Walter ins Schwärmen: „ALMA ist absolut gigantisch", sagt der Astronom. „Das ist ein Teleskop, das alles Bisherige in den Schatten stellt. Das ist ein Sprung wie vom menschlichen Auge zu Galileos Fernrohr."

Verglichen mit seinen Vorgängern vereint ALMA gleich mehrere Vorzüge: Das Teleskop ist nicht nur deutlich empfindlicher, seine einzelnen Schüsseln können auch bis zu sechzehn Kilometer auseinandergerückt werden. Submillimeter-Quellen aus dem extrem jungen Universum lassen sich dadurch einfacher finden, die Verteilung ihres Lichts und ihrer Massen kann detaillierter beobachtet werden.

Bis es so weit ist, werden fünf bis zehn Jahre vergehen. „Noch sind wir daher auf Modelle und Simulationen angewiesen", sagt Fabian Walter. Mit jeder neuen Beobachtung, egal ob derzeit mit IRAM oder künftig mit ALMA, eröffnet sich den Astronomen aber die Chance, ihre Modelle ein klein wenig besser an die damaligen Realitäten anzupassen – und damit mehr Licht ins dunkle Zeitalter des Universums zu bringen. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Das Universum wurde vor etwa 13,7 Milliarden Jahren im Urknall geboren. Bereits wenige Hundert Millionen Jahre später gab es Sterne und Galaxien.**
- **Einige der ersten Galaxien waren unvorstellbar produktiv: In ihnen entstanden offenbar Jahr für Jahr Sterne im Ausmaß von etwa tausend Sonnenmassen. Eine normale Galaxie wie unsere Milchstraße dagegen bringt es lediglich auf ein Tausendstel dieser Menge.**
- **Diese hohe Produktionsrate passt nicht zu theoretischen Modellen. Die Astronomen bemühen sich darum, möglichst viele Daten aus der Frühzeit des Weltalls zu sammeln.**
- **Die Beobachtung junger Galaxien und weit entfernter Quasare soll helfen zu verstehen, welche Prozesse im Innern der gigantischen ersten Sternfabriken ablaufen.**

GLOSSAR

Rotverschiebung: Sie ist bei Objekten, die sich mit großer Geschwindigkeit von der Erde entfernen, ein Maß für die Verschiebung der Wellenlänge in den roten Bereich des Spektrums und wird durch den Wert z dargestellt.

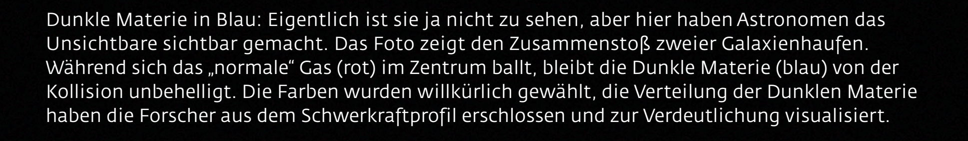
Rückblickzeit: Bei sehr großer Entfernung hängt die Rotverschiebung nicht nur von der Fluchtgeschwindigkeit der Objekte ab (Dopplereffekt). Vielmehr zieht die Ausdehnung des gesamten Raums das Licht in die Länge. Daher lässt sich aus dieser kosmologischen Rotverschiebung auch nicht ohne Weiteres auf die Entfernung des Objekts schließen; diese hängt unter anderem vom jeweils verwendeten kosmologischen Modell ab. Astronomen sprechen lieber von Rückblickzeit – der Zeit, die das Licht von dem Objekt bis zu uns unterwegs war und die angibt, in welchem Weltalter es auf die Reise ging.

Urknall: Das von Kosmologen bevorzugte Modell der Geburt des Universums. Demnach entstand der Kosmos vor 13,7 Milliarden Jahren aus einer unvorstellbar dichten und heißen Anfangssingularität, die sich physikalisch nicht beschreiben lässt. Heute wird das klassische Urknallmodell durch die Inflation erweitert – das schlagartige Aufblähen des extrem jungen Weltalls.

Fotos: Rob Ratkowski (links), privat (rechts)

Die Jagd nach dem Unsichtbaren

Sollten die Kosmologen recht haben, dann gibt es im All eine Form von Materie, die sechsmal häufiger vorkommt als die uns bekannte. Sie ist unsichtbar und heißt daher Dunkle Materie. Vor 80 Jahren erstmals postuliert, steht ihr direkter Nachweis bis heute aus. Forscher am **Max-Planck-Institut für Physik** in München und am **Max-Planck-Institut für Kernphysik** in Heidelberg wollen das kosmische Rätsel in den kommenden Jahren lösen.



Dunkle Materie in Blau: Eigentlich ist sie ja nicht zu sehen, aber hier haben Astronomen das Unsichtbare sichtbar gemacht. Das Foto zeigt den Zusammenstoß zweier Galaxienhaufen. Während sich das „normale" Gas (rot) im Zentrum ballt, bleibt die Dunkle Materie (blau) von der Kollision unbehelligt. Die Farben wurden willkürlich gewählt, die Verteilung der Dunklen Materie haben die Forscher aus dem Schwerkraftprofil erschlossen und zur Verdeutlichung visualisiert.

Foto: NASA, ESA, CXC, M. Bradac (University of California, St. Barbara) and S. Allen (Stanford University)

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

Über kaum ein anderes astrophysikalisches Thema diskutieren die Wissenschaftler derzeit so heftig wie über die Dunkle Materie. Besonders deutlich zeigte sich das im Herbst 2011, als in München Physiker aus aller Welt zusammenkamen, um sich über die neuesten Resultate auszutauschen. Drei Forschergruppen legten Messergebnisse vor, die mit dem Nachweis der mysteriösen Dunkle-Materie-Teilchen verträglich waren – aber sich gegenseitig widersprachen. Zudem hatten zwei andere Gruppen nichts gefunden und schlossen die positiven Ergebnisse explizit aus.

„Es könnte aber sein, dass die Teilchen ungewöhnliche Eigenschaften besitzen, sodass sie sich in einigen Detektoren bemerkbar machen, in anderen nicht", sagt Franz Pröbst, der am Münchener Max-Planck-Institut für Physik das Experiment CRESST (*Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers)* leitet. Es gehört zu jenen Detektoren, die Dunkle Materie nachgewiesen haben könnten.

Manfred Lindner stimmt dem im Prinzip zu, doch hält er es für plausibler, dass CRESST irgendeinen neuartigen Störeffekt sieht. Das internationale Experiment XENON100, dessen Beitrag Lindner am Max-Planck-Institut für Kernphysik leitet, hat nämlich mit deutlich höherer Sensitivität keine Ereignisse von möglichen Dunkle-Materie-Partikeln gefunden.

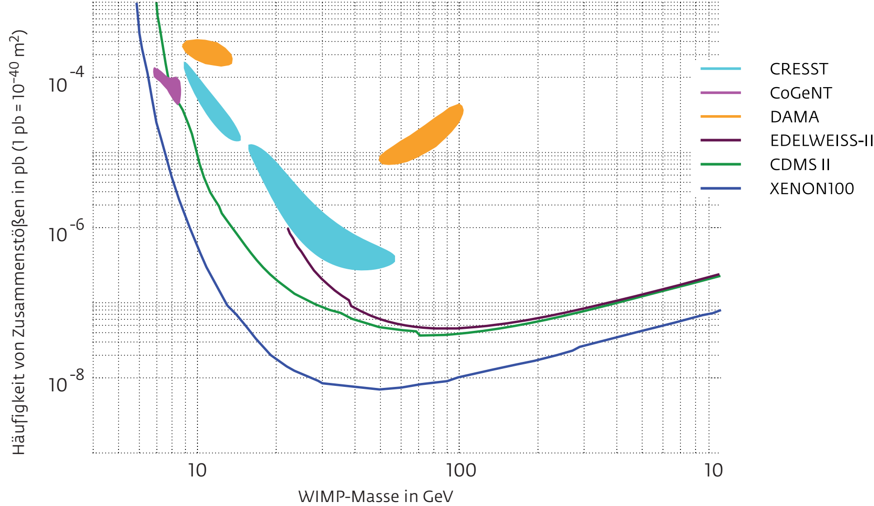
Die heiße Diskussion um „verschmutzte" Instrumente, Empfindlichkeitsgrenzen und Störeffekte spielt sich auf allerhöchstem Niveau ab. CRESST und XENON100 zählen zu den empfindlichsten und reinsten Experimenten der Erde. „Unser Detektor ist vermutlich der sauberste Ort im Universum", sagt Max-Planck-Direktor Lindner. Um die Anforderungen an die Technik zu verstehen, ist ein kurzer Rückblick in die Geschichte nötig.

Im Jahr 1933 beobachtete der in die USA emigrierte Schweizer Astronom Fritz Zwicky mehrere Galaxienhaufen. Dabei stellte er fest, dass die einzelnen Milchstraßensysteme sich so schnell darin bewegen, dass ihre gemeinsame Schwerkraft nicht ausreichen würde, um die Haufen zusammenzuhalten. Er schloss daraus, es müsse eine große Menge unsichtbarer Materie geben, die sich nur über ihre Schwerkraft äußert. Zwicky kreierte den Begriff Dunkle Materie.

UNBEKANNTE TEILCHEN BALLEN SICH ZU WOLKEN

Die Beobachtungen des Forschers gerieten jedoch in Vergessenheit und wurden erst in den 1970er-Jahren wiederbelebt. Damals fanden Astronomen heraus, dass Spiralgalaxien wie unsere Milchstraße so schnell rotieren, dass sie von der Fliehkraft zerrissen würden, gäbe es nicht die zusätzliche Schwerkraft der Dunklen Materie.

Heute sind die meisten Astroteilchenphysiker davon überzeugt, dass die unsichtbare Substanz aus einer unbekannten Sorte von Elementarteilchen besteht. Diese sollen sich zu riesigen Wolken zusammengeballt haben, die Galaxien umgeben und großräumig in den Galaxienhaufen verteilt sein. Es gibt eine Reihe weiterer astrophysikalischer Indizien für ihre Existenz, etwa die Bilder von Gravitationslinsen. Dar-



Dilemma: Sollte das Experiment CRESST tatsächlich Teilchen der Dunklen Materie gefunden haben, dann befinden sich diese in einer der beiden hellblauen Regionen. XENON100 schließt jedoch den Bereich oberhalb der blauen Kurve aus.

über hinaus, so die verbreitete Auffassung, sorgen die Dunkle-Materie-Teilchen dafür, dass sich die normale Materie nach dem Urknall relativ schnell zu Sternen und Galaxien verdichten konnte. Alle Indizien zeigen konsistent in dieselbe Richtung – und ohne diesen mysteriösen Wirk- und Klebstoff gäbe es uns überhaupt nicht.

Aus den bisherigen Beobachtungen und theoretischen Argumenten lassen sich einige Eigenschaften der unsichtbaren Partikel ableiten. Demnach besitzen die plausibelsten Kandidaten eine Masse, die etwa derjenigen von Atomen entspricht. Sie sind elektrisch neutral und gehen mit normaler Materie so gut wie keine Wechselwirkung ein. Anders gesagt: Sie durchqueren alle Körper im Universum nahezu ungehindert. Wegen

Foto: INFN – Luigi Ottaviani ; Grafik: MPI für Physik



Tunnel der Erkenntnis: Das Experimentalmodul CRESST befindet sich im Gran-Sasso-Untergrundlabor, wo es 1400 Meter Fels der Abruzzen vor der kosmischen Strahlung schützen. Zusätzlich müssen die Forscher ihre empfindliche Apparatur noch vor weiteren Störeinwirkungen bewahren. Insbesondere radioaktive Spurenelemente im Fels verursachen unerwünschte Signale. Die gefährlichste Störquelle ist Radon-222, das bei dem natürlichen Zerfall von Uran und Thorium entsteht.



dieser Eigenschaften haben sie den Namen *Weakly Interacting Massive Particles* erhalten. Bezeichnenderweise bedeutet das Akronym WIMP im Englischen so viel wie Schwächling.

UNSERE KÖRPER WERDEN VON WIMPS DURCHQUERT

Fasst man alles zusammen, was man heute zu wissen meint, dann rasen auf der Erde in jeder Sekunde rund 100 000 dieser Partikel durch eine Fläche von der Größe eines Daumennagels hindurch – auch durch unsere Körper, ohne dass wir das Geringste davon spüren. Das klingt fantastisch, ist aber gar nicht einmal so ungewöhnlich. So durchdringen in derselben Zeit etwa 65 Milliarden Neutrinos, die im Innern der Sonne entstehen, dieselbe Fläche; und diese Geisterteilchen kann man bereits durch seltene Stöße mit Materie sichtbar machen.

Alle derzeit arbeitenden Experimente gehen davon aus, dass auch die Dunkle-Materie-Teilchen durchaus mit normalen Atomen zusammenstoßen können, allerdings mit extrem geringer Rate. Das aber sollte sie verraten. Die zweifelsfreie Entdeckung von WIMPs wäre eine sensationelle Bestätigung des neuen Weltbilds und würde wahrscheinlich mit einem Nobelpreis belohnt werden.

Das Rezept ist bei allen Messapparaturen ähnlich: Man nehme ein geeignetes Detektormaterial und warte auf den sehr seltenen Fall, dass ein WIMP darin mit einem Atomkern zusammenstößt – und einen kurzen Lichtblitz erzeugt. Außerdem werden Elektronen frei, weil das angestoßene Atom mit anderen Atomen kollidiert und sich die äußeren Elektronen vom Atom lösen können.

Ist das Material ein Kristall, dann überträgt sich die Stoßenergie auf das Kristallgitter, und der Detektor erwärmt sich. Es gibt also die drei Messgrößen Licht, freie Ladungen und Temperatur. Keiner der derzeitigen Detektoren kann jedoch alle drei Größen gleichzeitig messen, sondern immer nur zwei. Das hat Auswirkungen auf die aktuelle Diskussion der Ergebnisse.

Franz Pröbst arbeitet seit 15 Jahren am Experiment CRESST, an dem Physiker der TU München sowie aus Tübingen und Oxford mitwirken. Das Herz der Anlage bilden Kristalle aus Calcium-

Foto: MPI für Physik – Michael Kiefer



Auf dem Prüfstand: Projektleiter Franz Pröbst (rechts) und sein Mitarbeiter Michael Kiefer testen im Labor des Max-Planck-Instituts für Physik Detektoren, die im CRESST-Experiment zum Einsatz kommen. Reinheit ist hierbei das oberste Gebot. Außerdem müssen die Detektoren bis auf etwa ein hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt werden.

wolframat mit jeweils vier Zentimeter Höhe und Durchmesser. Obwohl in jeder Sekunde mehrere Millionen WIMPs einen dieser Detektoren durchqueren sollten, erwartet Pröbst nicht mehr als einen Zusammenstoß pro Monat. Bei einem solchen Ereignis wird ein sehr schwacher Lichtblitz frei, und der Kristall erwärmt sich um wenige millionstel Grad. Wie soll man das messen?

EMPFINDLICHE EXPERIMENTE AM ABSOLUTEN NULLPUNKT

„Als wir damals mit dem Experiment anfingen, gab es hierfür überhaupt keine Messtechnik", erinnert sich Pröbst. Zusammen mit Wolfgang Seidel und Leo Stodolsky entwickelte der Physiker die heute verwendeten Kryodetektoren. Sie erhielten diesen Namen, weil sie bei einer extrem tiefen Temperatur von etwa einem hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad Celsius) arbeiten. Auf eine Seite des Kristalls wird ein dünner Wolframfilm aufgebracht, der als sensitives Thermometer dient. Die Temperatur wird nämlich genau so eingeregelt, dass sich der Film in einem Übergangszustand zwischen Normal- und Supraleitung befindet. Schon bei der geringsten Erwärmung erhöht sich der elektrische Widerstand so stark, dass er sich messen lässt.

Man kann das mit einer empfindlichen Wippe veranschaulichen, die sich gerade im Gleichgewicht befindet. Schon das kleinste Gewicht kann die eine Seite nach unten sinken lassen. Die Temperaturstabilisierung bis auf ein millionstel Grad genau zu halten ist eine extreme Herausforderung. Jeder Wolframfilm hat seine eigene Sprungtemperatur, die individuell eingestellt werden muss. „Die Eichung des Experiments kostet uns Monate", berichtet Pröbsts Mitarbeiter Michael Kiefer aus eigener leidvoller Erfahrung.

Mit CRESST können die Physiker auch den Lichtblitz aufspüren, den ein WIMP beim Zusammenstoß mit einem Atom im Kristall erzeugen soll. Dafür wird das Licht mit Spiegeln, die den Kristall vollständig umgeben, auf einen weiteren Tieftemperatursensor gelenkt. Der erwärmt sich, woraus die Forscher schließlich die Lichtenergie ableiten.

Jahrelange Arbeit war nötig, um diese Detektoren zum Laufen zu bringen. Doch es gibt ein weiteres Problem: Die Natur hält viele andere Quellen parat, die in den Kristallen ähnliche Signale erzeugen wie die WIMPs. Ein erster Schritt war der Aufbau von CRESST im Gran-Sasso-Untergrundlabor. Unter 1400 Meter Fels der Abruzzen ist das Experiment weitgehend vor Teilchen der kosmischen Strahlung geschützt, die unablässig aus dem All in die Erdatmosphäre prasseln.

Der größte Feind aber ist natürliche Radioaktivität in Form von kleinsten Spuren instabiler Isotope. Störend wir-

Foto: Felix Brandl

ken sich unter anderem radioaktive Radon-Isotope aus, die infolge des Zerfalls von Uran überall vorkommen – übrigens auch in der Raumluft eines Wohnhauses. Die bei radioaktiven Zerfällen freigesetzten Atomkerne, Elektronen, Neutronen und Gammastrahlen können in den Detektor eindringen und darin ein ähnliches Signal hervorrufen wie ein WIMP.

44 TONNEN SCHWERER MANTEL REDUZIERT DIE STÖREFFEKTE

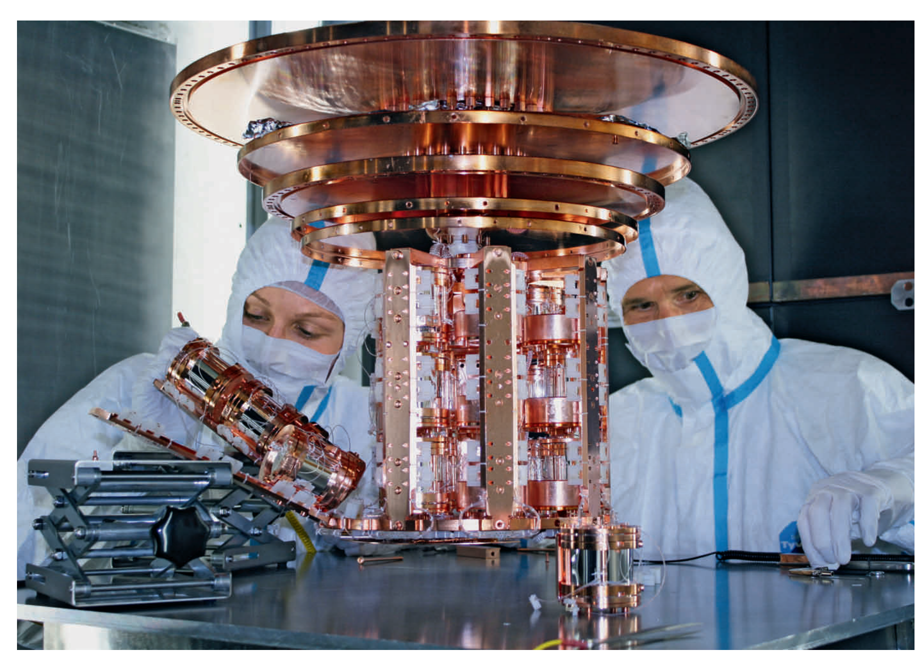
Um die Kristalldetektoren vor radioaktiver Störstrahlung zu schützen, fertigt man sie aus hochreinen Materialien. Und sie werden von mehreren, insgesamt 44 Tonnen schweren Mänteln aus Polyethylen, Blei und Kupfer umgeben. Dennoch bleibt ein kleiner Schmutzeffekt übrig. „Wir messen jetzt nur noch etwa alle hundert Sekunden ein Ereignis“, sagt Kiefer. Diese Ereignisse sind der störende Untergrund.

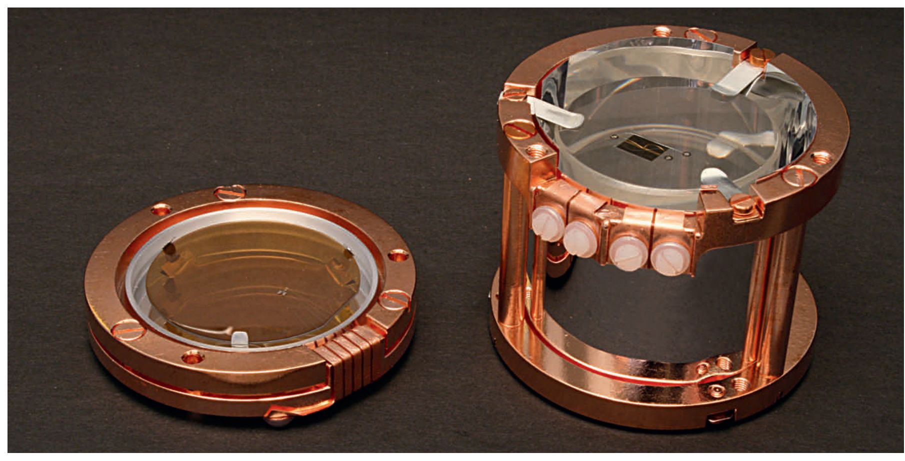
Dennoch ist die Lage nicht hoffnungslos. Aus der Analyse der Lichtenergie und der Erwärmung des Kristalls lassen sich nämlich die Störeffekte von den erwarteten WIMP-Signalen unterscheiden. Das derzeit noch aktuelle Ergebnis einer Messreihe von Mai 2009 bis April 2011 stellte die CRESST-Gruppe Ende 2011 in München vor. Insgesamt hatten die Forscher 67 Ereignisse registriert, von denen sie nur 46 mit bekannten Störeffekten erklären konnten. Stammen also die restlichen 21 von WIMPs?

Falls dem so ist, dann besitzen die Teilchen eine Masse, die etwa derjenigen eines Kohlenstoffatoms entspricht. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine zufällige, statistische Schwankung handelt, liegt bei 1 zu 100 000. „Es könnte aber noch ein unbekannter Störuntergrund sein“, sagt Pröbst. Ziel ist es derzeit, diesen Untergrund durch weitere Abschirmmaßnahmen auf ein Zehntel zu reduzieren. Außerdem verdoppeln die Forscher die Anzahl der Kristalle auf 18.

Das Experiment wird gerade im Gran-Sasso-Labor aufgebaut und soll Anfang 2013 wieder anlaufen. Falls die Schutzmaßnahmen wirken, sollte nach weiteren zwei Jahren Datennahme klar sein, ob CRESST wirklich WIMPs nachgewiesen hat oder nicht. Das Wettrennen um die Entdeckung der Dunklen Materie, an dem weltweit rund ein Dutzend Gruppen teilnehmen, ist also in vollem Gange. Eine Lösung des Rätsels scheint erstmals zum Greifen nahe. Doch momentan sind die Ergebnisse noch widersprüchlich.

Zwei Gruppen in den USA und in Italien haben ebenfalls ein positives Resultat verkündet – allerdings in einem anderen Massenbereich als CRESST. Ih-



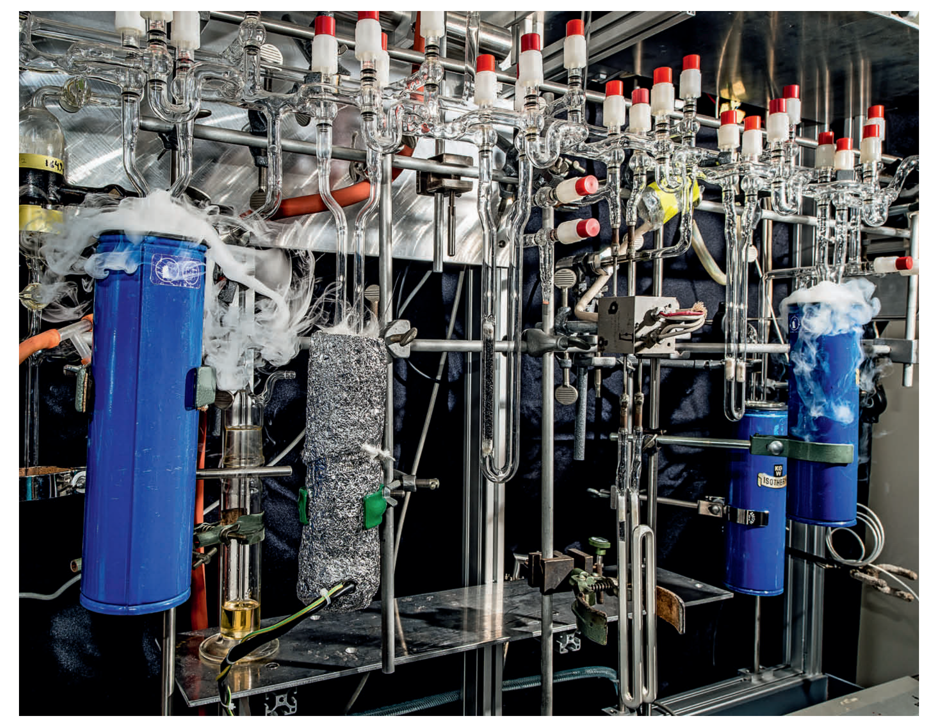


Im Reinraum: Bis zu 33 Detektoren müssen die Wissenschaftler im Gran-Sasso-Labor in ein CRESST-Modul einbauen. Ein Detektor wiederum besteht aus einem Calciumwolframat-Kristall, der sich im Innern eines hochreinen Kupfergehäuses befindet. Bei Eindringen eines Teilchens in den Kristall erwärmt sich dieser geringfügig, und es entsteht ein kurzer Lichtblitz. Beides wird als Signal gemessen.

Fotos: LNGS (2)

Besprechung im kleinen Kreis: XENON100-Projektleiter Manfred Lindner (Mitte) diskutiert mit seinen beiden Mitarbeitern Teresa Marrodán Undagoitia und Hardy Simgen über den Aufbau eines Teststands für neu entwickelte, empfindliche Lichtsensoren (Photomultiplier). Diese müssen extrem rein sein und dürfen keine natürliche Radioaktivität enthalten, welche die Messung empfindlich stören würde. Am Max-Planck-Institut für Kernphysik steht die derzeit wohl weltweit empfindlichste Anlage zur Gasanalytik. Hier werden alle Bauteile auf Verunreinigungen geprüft, die bei dem XENON-Experiment zum Einsatz kommen.





Fotos: MPI für Kernphysik – Christian Foehr (2)

nen allen widersprechen das ebenfalls im Gran-Sasso-Labor arbeitende Experiment XENON100 sowie ein amerikanischer Versuch. Bei XENON100 dienen 162 Kilogramm flüssiges Xenon als Detektormaterial. Wenn ein WIMP darin mit einem Atom zusammenstößt, erzeugt es einen Lichtblitz, den empfindliche Fotodetektoren registrieren. Außerdem werden Elektronen frei, die über ein außen angelegtes elektrisches Feld an die Oberfläche gezogen und dort gemessen werden.

EIN KRYPTONATOM UNTER EINER BILLION XENONATOMEN

Auch in diesem Experiment ist radioaktive Störstrahlung, insbesondere von Radon und Krypton, der größte Feind. Die Forscher beziehen ihr Xenon möglichst rein von weltweit wenigen Produzenten. Mit extremem Aufwand wird die Substanz dann weiter gereinigt. „Die Flüssigkeit enthält so wenige Verunreinigungen wie ein Kubikkilometer reines Wasser, in das man einmal hineinhustet", veranschaulicht Manfred Lindner.

Das Heidelberger Max-Planck-Institut für Kernphysik bringt in diese Kooperation seine jahrzehntelange Erfahrung aus der Neutrinoforschung ein. In dem Sonnenneutrino-Experiment GALLEX ging es einst darum, in einer großen Menge Gallium einige wenige, durch Neutrinos erzeugte Germaniumatome nachzuweisen. „Heute können wir ein Kryptonatom unter mehr als einer Billion Xenonatomen aufspüren", sagt Hardy Simgen, der diese wohl weltweit empfindlichste Anlage zur Gasanalytik in- und auswendig kennt. „Im menschlichen Körper finden pro Sekunde durchschnittlich 8500 radioaktive Zerfälle statt. Wir

weisen in 100 Kilogramm Material wenige Zerfälle pro Jahr nach."

Alle Materialien, die für das Experiment verwendet werden, gehen vorher durch diese Anlage. Jüngst gab es ein Problem mit neuen Lichtsensoren für das Nachfolgeprojekt mit einer Tonne Xenon. Sie waren, gemessen an den enormen Reinheitsanforderungen, zu radioaktiv, womit sie die Messung vollständig zerstören würden. Jetzt haben die Physiker in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma reinere Materialien ausgesucht, um die Anforderungen zu erfüllen.

Das Xenon befindet sich in einem ständigen Reinigungskreislauf – einer Art Dialyse, die immer wieder aufs Neue eindringendes Radon entfernt. In diesem Bereich bringen die Heidelberger Forscher große Erfahrung aus dem Sonnenneutrino-Experiment ein. Mit einer mobilen Radon-Extraktionsanlage testen sie die Reinigungseffizienz unter realistischen Bedingungen.

Und mit einem Trick ist es den Wissenschaftlern gelungen, XENON100 zu dem derzeit mit Abstand empfindlichsten aller WIMP-Experimente zu machen: Weil die Verunreinigungen von den Außenwänden in das Xenon eindringen, wählen die Physiker nur Ereignisse aus, die sich im inneren Bereich des Detektors ereignen. So verwenden sie für die WIMP-Suche nur das zentrale, besonders saubere Drittel des gesamten Volumens.

Auf diese Weise ließ sich die Anzahl der Störereignisse auf ein Minimum reduzieren. Deshalb erscheint ihr Ergebnis – nämlich kein signifikantes WIMP-Ereignis – sehr überzeugend. Wenn CRESST wirklich Dunkle-Materie-Teilchen nachgewiesen hätte, hätte XENON100 mehr als hundert Ereignisse messen müssen.

Manfred Lindner zieht aus der derzeitigen Situation die Schlussfolgerung: Eine Lösung wäre, dass zwei der drei Experimente einen unverstandenen Untergrund messen, während das andere tatsächlich WIMPs sieht. Diese müssten dann allerdings sehr ungewöhnliche Eigenschaften besitzen, sodass sie für XENON100 unsichtbar bleiben. Ganz ausschließen lässt sich das nicht, weil etwa CRESST den Lichtblitz und die Wärmeentwicklung misst, die ein WIMP bei Kollision mit einem Atom im Detektor erzeugt. XENON100 hingegen misst den Lichtblitz und die erzeugte Ionisierungsrate. „Die andere Lösung mit weniger speziellen Annahmen ist, dass keines der bisher gesehenen Signale von WIMPs stammt", sagt Lindner.

ZWEIFEL AN DER GÜLTIGKEIT DES GRAVITATIONSGESETZES?

Beim XENON-Experiment geht die Entwicklung weiter. In Vorbereitung ist eine Erweiterung auf eine Tonne Xenon. Je größer der Detektor, desto mehr WIMP-Ereignisse können darin stattfinden. Allerdings wächst auch das Problem der Verschmutzung über die größere Oberfläche – und dadurch steigen die Anforderungen an die Reinheit der Detektormaterialien und des Xenons. Hier können die Heidelberger Saubermänner also ihr ganzes Know-how ausspielen. Ende 2014 soll die Anlage mit einer um einen weiteren Faktor 100 gesteigerten Sensitivität anlaufen und 2016 ein erstes Ergebnis liefern.

Bleiben die dunklen Teilchen unauffindbar, wird es für die plausibelste Erklärung der Dunklen Materie in Form von WIMPs eng. Man müsste dann ernsthafter über andere Partikel nachdenken. Falls die Dunkle Materie doch nicht existiert, könnte man an der Gültigkeit der Gravitationsgesetze zweifeln. Alternative Erklärungen gibt es seit Langem, aber sie können nicht alle astrophysikalischen Phänomene, für die man die Dunkle Materie postuliert, einheitlich konsistent erklären. Außerdem müsste man dann Einsteins Gravitationstheorie in einer Weise abändern, die, vorsichtig formuliert, sehr wenig motiviert erscheint. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Etwa 23 Prozent der insgesamt im Universum vorhandenen Materie bleiben astronomischen Instrumenten verborgen.**
- **Schon in den 1930er-Jahren schloss Fritz Zwicky aus Beobachtungen an Galaxienhaufen auf die Existenz der Dunklen Materie.**
- **Heute suchen Physiker in aller Welt mit speziellen Detektoren nach diesem rätselhaften Stoff, der sich in sogenannten WIMPs zeigen sollte.**
- **Weil die WIMPs mit Teilchen der normalen Materie kaum wechselwirken, ist ihr Nachweis überaus schwierig. Die bisherigen Messergebnisse widersprechen sich zum Teil und werden heiß diskutiert.**

GLOSSAR

Galaxienhaufen: Ansammlungen von bis zu mehreren Tausend Milchstraßensystemen (Galaxien), die durch die Schwerkraft aneinander gebunden sind.

Gran-Sasso-Labor: Der Gran-Sasso-Tunnel durchquert das Massiv des Gran Sasso d'Italia in den italienischen Abruzzen. Er ist nicht nur der längste zweiröhrige Autobahntunnel Europas, sondern beherbergt in Nebenanlagen die Laboratori Nazionali del Gran Sasso, die weltweit größten unterirdischen Versuchslabors für Elementarteilchenphysik.

Gravitationslinse: Das von Albert Einstein vorausgesagte Phänomen, wonach Licht durch das Gravitationsfeld einer Masse abgelenkt wird wie durch eine optische Linse. Hinter diesem Effekt steckt im Weltall meist eine Galaxie oder ein Galaxienhaufen.

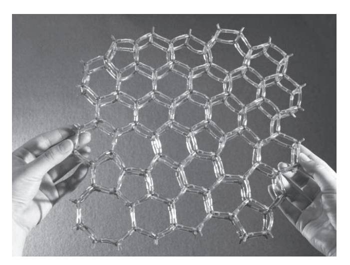
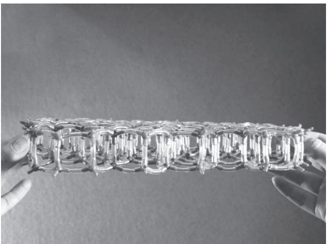
Neutrinos: Elektrisch neutrale Partikel mit winziger Masse. Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik existieren drei Arten: das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino. Neutrinos wechselwirken kaum mit Materie, daher durchdringen sie nahezu ungehindert selbst große Schichtdicken – etwa die ganze Erde.

Klarer Blick ins Glas

Erstmals haben Berliner Forscher die Atomstruktur von amorphem Siliciumdioxid analysiert

Glas sorgt für eine klare Sicht, nur wie es in seinem Inneren aussieht, hat es bislang gut verborgen – zumindest, wenn es um die genaue Position der Atome geht. Wissenschaftler des Fritz-Haber-Instituts der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin haben jetzt erstmals die Struktur aus Silicium- und Sauerstoffatomen – den Hauptbestandteilen von Glas – in einer ungeordneten Siliciumdioxidschicht abgebildet. Zu diesem Zweck schauten sie mit hochauflösenden Mikroskopen auf die nur zwei Atomlagen dünne Glasschicht, deren innere Ordnung sich mit herkömmlichen Methoden der Strukturaufklärung nicht untersuchen lässt. Dabei bestätigten die Forscher, dass Gläser aus einem Netz unterschiedlich großer Ringe aufgebaut sind, in denen sich Silicium- und Sauerstoffatome abwechseln. Dies hatte der norwegisch-amerikanische Physiker William H. Zachariasen bereits 1932 postuliert. In weiteren Studien beobachteten die Forscher den Übergang von einer kristallinen in eine ungeordnete Struktur. Die Erkenntnisse aus ihren Untersuchungen könnten etwa bei der Suche nach leistungsfähigeren Katalysatoren helfen, bei denen ungeordnetes Siliciumdioxid als Trägermaterial dient.

(Journal of Physical Chemistry C, 8. August 2012)

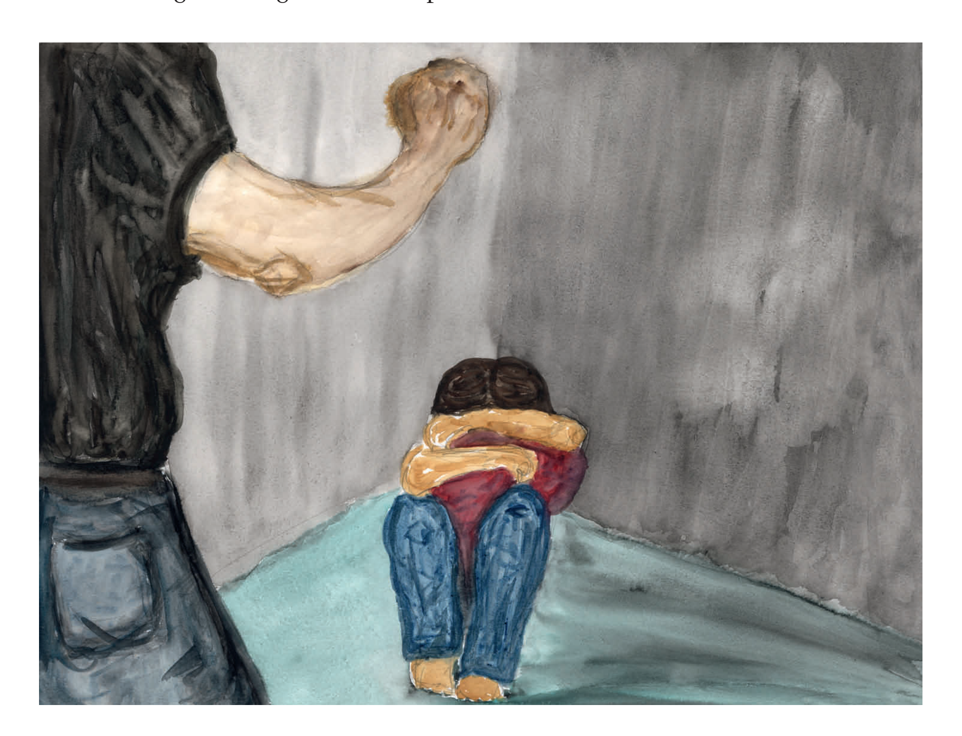
Ein zweidimensionales Glas im Modell: Messungen von Berliner Max-Planck-Forschern belegen, dass ungeordnetes Siliciumdioxid eine Struktur bildet, in der neben Sechsecken häufig Fünf- und Siebenecke entstehen.

Traumatische Spuren im Erbgut

Misshandlungen im Kindesalter führen zu epigenetischen Veränderungen an Hormon-Gen

Misshandelte Kinder leiden oft ihr Leben lang unter den Erlebnissen und erkranken als Erwachsene an Depressionen oder Angststörungen. Ob ein Opfer tatsächlich krank wird, hängt entscheidend von dessen genetischer Veranlagung ab. Denn nur bei Menschen mit einer bestimmten Variante des FKBP5-Gens steigt mit wachsender Schwere der Misshandlung auch die Gefahr, an einer posttraumatischen Belastungsstörung zu erkranken. Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München haben jetzt herausgefunden, dass traumatische Erlebnisse diese FKBP5-Genvariante epigenetisch verändern können. Dabei wird von dem Gen eine Methylgruppe abgespalten. Dies verstärkt die Wirkung des Gens und kann den Haushalt der Stresshormone dauerhaft stören und schließlich zu einer psychiatrischen Erkrankung führen. Die epigenetische Veränderung der DNA wird vor allem durch Traumata im Kindesalter erzeugt, nicht dagegen im Erwachsenenalter. Durch diese Erkenntnisse könnten in in Zukunft Traumaopfer mit einem besonders hohen Erkrankungsrisiko identifiziert und behandelt werden.

(Nature Neuroscience, 3. November 2012)



Misshandelte Kinder leiden oft ihr Leben lang unter ihrem Trauma. In Zeichnungen drücken Betroffene ihre Ängste aus.

Foto: Fritz-Haber-Institut – Markus Heyde (oben), MPI für Psychiatrie (unten)

Inspiration für den Neandertaler

Kultureller Austausch zwischen modernen Menschen und ihren Verwandten

Der *Homo sapiens* brachte Kunst und Kultur nach Europa. Dies schließen manche Wissenschaftler aus Funden früher steinzeitlicher Werkzeuge und Schmuckgegenstände. Einige halten jedoch den Neandertaler für den Schöpfer mancher Objekte. Offenbar zu Recht: Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig zufolge haben tatsächlich Neandertaler in der Phase des Châtelperronien vor rund 40 000 Jahren komplexe Werkzeuge und Schmuckgegenstände hergestellt – nachdem sie sich diese Fertigkeiten vom modernen Menschen abgeschaut hatten. Die Wissenschaftler konnten Funde aus den Grotten du Renne und Saint-Césaire in Frankreich mit modernsten Techniken der Radiokohlenstoffdatierung auf ein Alter von 41 000 bis 44 500 Jahren bestimmen. Ein Neandertalerskelett aus Saint-Césaire datiert auf 41 500 Jahre. Die Leipziger Forscher schließen daraus, dass Neandertaler die Fundstücke aus dem Châtelperronien hergestellt haben. Zu diesem Zeitpunkt hatte der moderne Mensch Südfrankreich und Deutschland bereits besiedelt und neue Verhaltensweisen mitgebracht. Offensichtlich standen die beiden Menschengruppen in kulturellem Austausch.

(PNAS, online veröffentlicht 29. Oktober 2012)

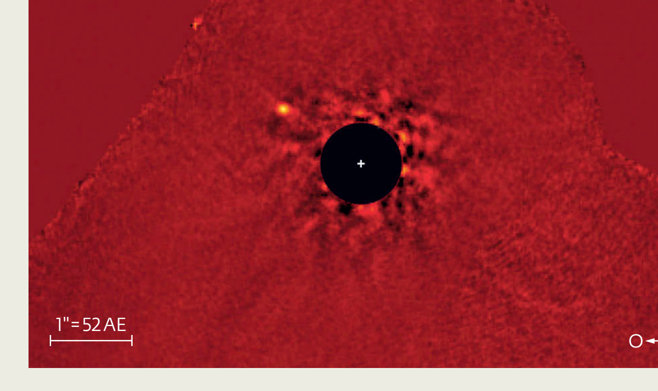


Körperschmuck aus der Grotte du Renne bei Arcy-sur-Cure in Frankreich aus der Zeit des Châtelperronien. Neuesten Datierungen zufolge haben Neandertaler die Gegenstände hergestellt.

Super-Jupiter im Porträt

Eine Entdeckung im Sternbild Andromeda wirft neues Licht auf die Geburt von Planeten

Bilder von extrasolaren Planeten gestalten sich schwierig: Die Himmelskörper sind sehr weit weg, verhältnismäßig klein und gehen im Licht ihres Muttersterns unter. Dennoch ist Forschern, unter anderem aus dem Max-Planck-Institut für Astronomie, am Subaru-Teleskop auf Hawaii die Aufnahme eines Super-Jupiters mit der 13-fachen Masse unseres Jupiters gelungen. Er umkreist den Stern Kappa Andromedae, der die 2,5-fache Sonnenmasse besitzt und mit geschätzten 30 Millionen Jahren sehr jung ist. Der neue Exoplanet ist von seinem Mutterstern rund acht Milliarden Kilometer entfernt. Die Astronomen glauben, dass sich der Himmelskörper sehr wahrscheinlich so ähnlich gebildet hat wie ansonsten nur kleinere Planeten niedrigerer Masse: in einer protoplanetaren Scheibe aus Gas und Staub, die den jungen Stern während seiner frühesten Entwicklungsphasen umgab. Das macht die Entdeckung zu einem Testfall für aktuelle Modelle der Planetengeburt. (Astrophysical Journal Letters, im Druck)



Astronomischer Volltreffer: Falschfarben-Nahinfrarotbild des Kappa-Andromedae-Systems, aufgenommen mit dem Subaru-Teleskop auf Hawaii im Juli 2012. Der Großteil des Lichts vom Mutterstern, auf den das Foto zentriert ist, wurde durch Bildverarbeitung herausgefiltert. Der Super-Jupiter Kappa Andromedae b ist oben links deutlich zu sehen.

Fotos: Marian Vanhaeren und Michele Julien (oben), NAOJ / Subaru / J. Carson (College of Charleston) / T. Currie (University Toronto) (unten)

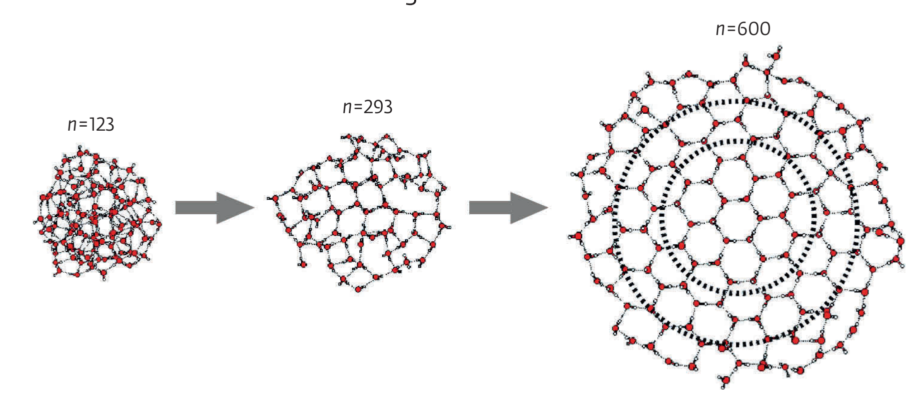
Die Wege der Seuchen

Ein neues Computermodell schätzt schnell und genau ab, wer eine Infektion besonders weit verbreitet, und erleichtert so Gegenmaßnahmen

Eine neue computergestützte Methode, die Forscher des Max-Planck-Instituts für Mathematik in den Naturwissenschaften entwickelt haben, könnte helfen, Epidemien künftig wirkungsvoller einzudämmen. Im Kern identifiziert das neue Verfahren jene Personen in der Bevölkerung, die eine Infektion am stärksten verbreiten. Die Vorgehensweise zeichnet sich dadurch aus, dass sie mit wesentlich weniger Rechenaufwand als vergleichbare Präzisionsverfahren die tatsächliche Anzahl von Menschen abschätzt, die eine bestimmte Person direkt oder indirekt anstecken kann. Diese Eigenschaft hängt mit der Struktur der sozialen Netzwerke zusammen, in die ein Infizierter integriert ist. Die Information, wie viel mehr Menschen eine Person im Vergleich zu einem weniger virulenten Überträger ansteckt, ist vor allem in Zeiten knapper Impfstoffe wichtig. In solchen Fällen müssen Ärzte wissen, welche Individuen sie bevorzugt impfen sollen, um eine Epidemie möglichst effektiv zu verhindern.
(EPL, 5. Oktober 2012)

Die kleinsten Eiskristalle der Welt

Ein raffiniertes Experiment deckt auf, ab wie vielen Molekülen Wasser eine kristalline Ordnung bildet



Am Ursprung des perfekten Kristalls: Wasser kristallisiert in einer sechszähligen Symmetrie, die an jeder Schneeflocke zu erkennen ist. Diese Ordnung bildet sich bereits in Wasserclustern mit 475 Molekülen aus, die mit einer Schneeflocke noch keine Ähnlichkeit haben.

Auch Eiskristalle fangen mal klein an, sogar kleiner als bisher gedacht. Schon 475 Wassermoleküle bilden eine echte kristalline Ordnung, erste Ansätze davon sind bereits ab 275 Molekülen zu erkennen. Bisher galten etwa 1000 Moleküle als Minimum für einen vollständigen Kristall. Die neue Untergrenze für Eisklümpchen haben die Forscher um Thomas Zeuch von der Universität Göttingen mit einem Experiment bestimmt, das Udo Buck vom Göttinger Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation entwickelt hat. Bei Temperaturen von minus 180 bis minus 150 Grad erzeugten die Forscher Wassercluster unterschiedlicher Größe. Ab welcher Anzahl sich die Moleküle eine kristalline Ordnung formten, ermittelten die Forscher, indem sie die Eisklümpchen mit Infrarotlicht durchleuchteten. Dieses Licht bildet ab, wie die Moleküle schwingen. Das Schwingungsprofil ändert sich, sobald die Moleküle einen Kristall formen. Das Ergebnis, so hoffen die Wissenschaftler, könnte Klimaforschern helfen, die Bildung von Eiswolken in der oberen Atmosphäre genauer zu verstehen und damit ihre Klimamodelle zu verbessern. (Science, 21. September 2012)

Grafik: MPI für Dynamik und Selbstorganisation – Udo Buck

Auge um Auge, Zahn um Zahn

Fehden und Blutrachen kommen in vielen Gesellschaften vor und erstrecken sich manchmal über Jahrzehnte. Und dies, obwohl theoretische Berechnungen zeigen, dass sie aus evolutionärer Sicht für die Beteiligten zu kostspielig sind und sich deshalb nicht entwickeln sollten. Denn meist sind sie ohne offensichtlichen Nutzen, und der Schaden für die Beteiligten ist enorm. Forscher vom Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön und der Universität Göttingen haben nun mithilfe von Gemeinwohlspielen und dem Gefangenendilemma nachgewiesen, dass sich in Gruppen mehrerer Individuen aus Konflikten durchaus Fehden entwickeln können. Bestrafungen, die eigentlich Fehlverhalten sanktionieren und die Kooperationsbereitschaft erhöhen sollen, eskalierten in den Experimenten der Wissenschaftler regelmäßig zu Fehden, insbesondere dann, wenn die ursprüngliche Strafe ungerecht oder zu hoch ausfiel. In Zweierbeziehungen hatten Fehden dagegen keinen Bestand – die Nachteile sind für die Beteiligten offenbar zu groß. Auch wenn Fehden erhebliche Probleme mit sich bringen, so können sie den Forschern zufolge in größeren Gruppen Gerechtigkeit zwischen zwei Parteien herstellen und vor ungerechter oder zu hoher Bestrafung schützen.
(PLOS ONE, 19. September 2012)

Späte Geburt, gesundes Leben

Kinder von Frauen um die 40 erkranken im späteren Leben nicht häufiger als der Nachwuchs von etwa 30-jährigen Müttern

Über die spätere Gesundheit eines Kindes bestimmt nicht das Alter der Mutter bei der Geburt, sondern ihre Bildung und die Anzahl der Jahre, die sie noch mit ihrem Kind gemeinsam erlebt. Dies ergab eine Studie, die Mikko Myrskylä vom Max-Planck-Institut für demografische Forschung mit den Daten von mehr als 18 000 US-Amerikanern durchführte. Die Wissenschaftler bereinigten die Gesundheitsdaten um mögliche weitere Einflussfaktoren wie Bildungsstand und Lebensspanne der Mutter. So kamen sie zu dem Ergebnis, dass Kinder, deren Mütter bei der Geburt 35 bis 44 Jahre alt waren, als Erwachsene nicht häufiger krank sind als die von Müttern im Alter 25 bis 34. Dies widerspricht der bisherigen Annahme, dass der erwachsene Nachwuchs spät gebärender Mütter häufiger krank ist, weil der Körper der Frau zum Zeitpunkt der Geburt schon abgebaut hatte – etwa weil aus Altersgründen die Eizellen schlechter oder die Plazenta schwächer geworden sind. Allerdings bleibt richtig, dass im fortgeschrittenen Alter die Wahrscheinlichkeit für Fehlgeburten und Krankheiten wie das Down-Syndrom steigt. Warum sich die Zahl der gemeinsam mit der Mutter erlebten Jahre auf die spätere Gesundheit des Kindes auswirkt, wissen die Forscher noch nicht genau. Möglicherweise können Mütter ihre Kinder beim Start ins Leben desto besser unterstützen, je länger sie für den Nachwuchs da sind.
(Demography, 28. August 2012)

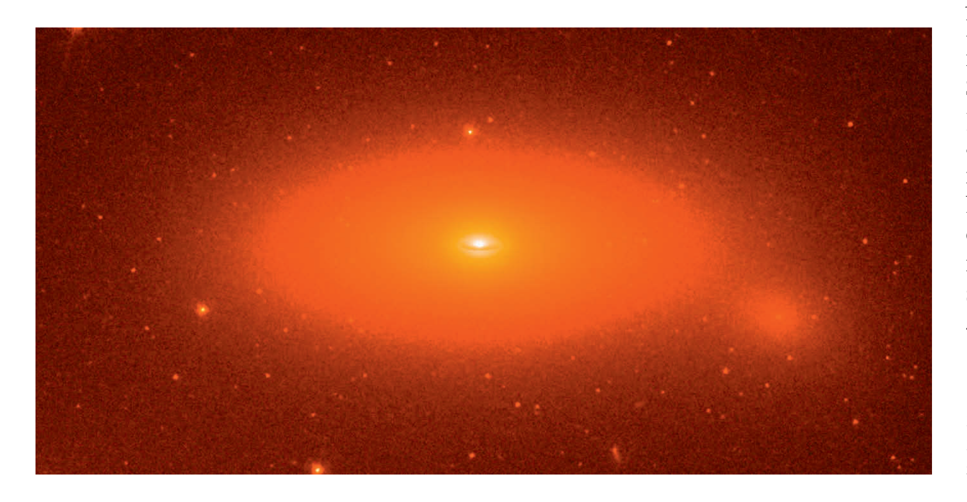


Für die Gesundheit der Kinder ist nicht das Alter der Mutter entscheidend, sondern deren Bildung und die Anzahl der Jahre, die Mutter und Kind gemeinsam erleben.

Schwarzes Loch wirbelt Galaxienmodelle durcheinander

Ungewöhnlich massereiches Objekt in einer kleinen Milchstraße fordert Theoretiker heraus

Im Herzen einer jeden Milchstraße lauert ein superschweres schwarzes Loch. Dessen Masse macht meist etwa 0,1 Prozent der Gesamtmasse der Muttergalaxie aus. So weit die Beobachtungen, die mit den gängigen Modellen der galaktischen Evolution in Einklang stehen. Jetzt hat ein internationales Team um Remco van den Bosch vom Max-Planck-Institut für Astronomie ein schwarzes Loch aufgespürt, das diesen Zusammenhang offenbar aushebelt. Die Forscher nutzten dafür das Hobby-Eberly-Teleskop in Texas sowie archivierte Bilder des Weltraumteleskops *Hubble* und fanden in der kleinen Galaxie NGC 1277 eine Schwerkraftfalle mit nicht weniger als 17 Milliarden Sonnenmassen. Damit könnte das Objekt einen Rekord im „Schwergewicht" aufstellen. Seine Masse beträgt ungefähr 14 Prozent der Gesamtmasse von NGC 1277 – also deutlich mehr als die oben genannten 0,1 Prozent. Die Astronomen hätten ein derart gigantisches schwarzes Loch in einer mindestens zehnfach größeren Galaxie erwartet.
(Nature, 29. November 2012)



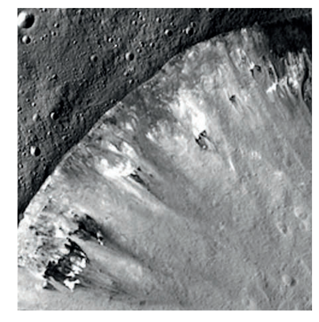
Unsichtbare Schwerkraftfalle: Im Zentrum der Scheibengalaxie NGC 1277 sitzt mit 17 Milliarden Sonnenmassen eines der gewichtigsten schwarzen Löcher, die jemals gefunden wurden.

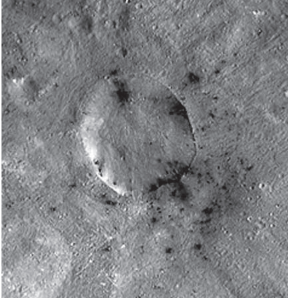
Foto: FrOnline (oben), NASA/ESA/Andrew C. Fabian / Remco C. van den Bosch, MPIA (unten)

Der erschütterte Protoplanet

Heftige Einschläge auf Vesta lieferten einst kohlenstoffhaltiges Material

Der Protoplanet Vesta mit einem Durchmesser von etwa 525 Kilometern hat eine bewegte Vergangenheit: Aufnahmen der deutschen Framing Camera an Bord der US-Raumsonde *Dawn* zeigen zwei gewaltige Krater auf der Südseite. Sie entstanden bei Einschlägen, die nicht nur die Form, sondern auch die mineralogische Zusammensetzung des Himmelskörpers dauerhaft veränderten. Wissenschaftler unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung haben nun festgestellt, dass die beiden kosmischen Brocken, die vor einer bis zwei Milliarden Jahren die Südseite von Vesta erschütterten, dunkles, kohlenstoffhaltiges Material mitbrachten. Damit ließen sich die einzigartigen Helligkeitsunterschiede erklären, denn das dunkle Material, das sich überall auf der Oberfläche findet, reflektiert ebenso wenig Licht wie Kohle. Die Forscher glauben, dass ähnliche Kollisionen in der Frühzeit des Sonnensystems auch die inneren Planeten wie die Erde mit Kohlenstoff, einem Grundbaustein organischer Verbindungen, versorgt haben. (ICARUS, Vol. 221, Issue 2, November/Dezember 2012)





Narben aus der Frühgeschichte: Die größte Menge des kohlenstoffreichen, dunklen Materials auf Vesta findet sich an den Rändern kleinerer Krater (links) oder als einzelne Sprenkel in ihrer Umgebung (rechts). Es kam durch die Kollision mit kosmischen Brocken auf die Oberfläche des Protoplaneten.

Gemeinsames Musizieren vernetzt Gehirne

Nervenzellen können sich hirnübergreifend synchronisieren

Beim gemeinsamen Musizieren kommt der Impuls für das eigene Handeln von der koordinierten Aktivität der Gruppe. Tatsächlich synchronisieren sich dabei auch die Gehirne – dies haben Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Bildungsforschung in Berlin nachgewiesen. Sie haben mithilfe von Elektroden am Kopf die Hirnwellen von Gitarristen verfolgt, während diese ein Duett spielten. Dabei synchronisierten sich vor allem die sogenannten Deltawellen mit einer Frequenz unter vier Hertz, und zwar sowohl im Gehirn jedes einzelnen Musikers als auch zwischen den beiden Akteuren. Die Gleichschaltung der Hirnwellen war beim anführenden Spieler stärker ausgeprägt und schon vor dem Spielanfang vorhanden. Die Berliner Forscher führen den Gleichtakt der Hirnwellen beider Spieler auf eine aktive Synchronisierung zurück und nicht darauf, dass die beiden das Gleiche tun. Denn die Gitarristen spielten unterschiedliche Stimmen. Eine solche Synchronisation zwischen Gehirnen entsteht vermutlich nicht nur beim Musizieren, sondern möglicherweise auch wenn Menschen ihr Handeln auf andere Weise koordinieren, etwa beim Sport oder Tanzen. (FRONTIERS IN HUMAN NEUROSCIENCE, 29. November 2012)



64 Elektroden zeichnen die elektrische Aktivität im Gehirn der Gitarristinnen auf.

Fotos: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA (oben, 2), MPI für Bildungsforschung – Schulze (unten)

Mehr Kohlendioxid macht weniger Dampf

Die Hauptursache für den menschengemachten Treibhauseffekt, die zunehmende Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre, hat einen unerwarteten Nebeneffekt: Es verdunstet weniger Wasser. Ursache für diesen scheinbaren Widerspruch sind Pflanzen, deren Milliarden winziger Blattporen sich bei erhöhtem CO_2-Gehalt für eine kürzere Zeit öffnen und so weniger Feuchtigkeit nach außen abgeben. Zu dieser Erkenntnis kam ein internationales Forscherteam, an dem auch Wissenschaftler der Max-Planck-Institute für Chemie und Meteorologie beteiligt waren. Das Team simulierte drei Szenarien: die Verdopplung des aktuellen CO_2-Gehaltes in der Atmosphäre, die Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um zwei Grad Celsius und eine Kombination aus beidem. Anders als bei einem reinen Anstieg der Temperatur sank bei der erhöhten CO_2-Konzentration die Verdunstung. Gemäß dem letzten, realistischen Szenario gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die Verdunstung um etwa 15 Prozent abnehmen wird. So ergibt sich eine bislang unbekannte Rückkopplung, in der sich die Erderwärmung verstärkt, weil sich weniger Wolken bilden.

(Nature Geoscience, 2. September 2012)



Weil mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre die Verdunstung aus Pflanzen hemmt, entstehen künftig womöglich weniger Wolken.

Quantenstress in Nanoschichten

Ultradünne Schichten aus Metallen oder Halbleitern finden in Leseköpfen von Festplatten, Lasern von DVD-Spielern und vielen anderen Geräten Anwendung. Einwandfrei funktionieren die Geräte nur, wenn die Schichten fehlerfrei sind. Doch schon bei der Herstellung entstehen Spannungen in den Filmen, die Defekte in deren Struktur bewirken. Einen bislang unbekannten Mechanismus, der in Schichten von wenigen Atomlagen schädliche Spannungen bis zum Tausendfachen des Atmosphärendrucks erzeugt, haben Forscher am Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart entdeckt. Seine Ursache liegt in den Welleneigenschaften der Elektronen. Deren Wellenlänge entspricht etwa der Dicke der Nanoschicht. Das hat zur Folge, dass die Elektronen, vereinfacht gesprochen, nicht in beliebig hohe Stapel der Atomlagen passen. Denn den Gesetzen der Quantenmechanik zufolge finden darin nur ganze Wellenzüge Platz, sodass der Stapel mal gerade ein bisschen zu dünn ist, mal ein bisschen zu dick. Daher schrumpft oder weitet sich die Schicht entlang der Stapelrichtung. In der Reaktion darauf wird sie senkrecht dazu gedehnt beziehungsweise gestaucht. Dieser Mechanismus lässt sich möglicherweise für hochsensible Gassensoren nutzen.

(Physical Review Letters, 27. Juli 2012)

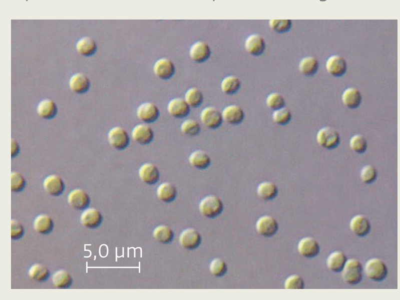
Tauschgeschäft im Ozean

Symbiose sorgt für Stickstoffdüngung der Meere

Stickstoff ist ein unverzichtbarer Nährstoff für das Zellwachstum. Doch nur wenige Organismen können den Stickstoff gasförmig in der Atmosphäre oder gelöst im Wasser nutzen. Ein vor Kurzem entdecktes Cyanobakterium besitzt wie zahlreiche andere Vertreter dieser Mikroorganismen diese Fähigkeit. Ungewöhnlich für Cyanobakterien ist, dass der neu gefundene Einzeller nicht durch Fotosynthese Kohlenstoffverbindungen aufbauen kann – eine Fähigkeit, die wiederum die unzähligen Algen des Planktons besitzen. Es liegt also nahe, sich zusammenzutun. Forscher vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen haben nun eine Symbiose zwischen dem Bakterium und einzelligen Algen aus der Gruppe der Prymnesiophyten nachgewiesen. Das Bakterium liefert der Alge Stickstoff und erhält im Gegenzug Kohlenstoffverbindungen. Dabei sitzt es vermutlich huckepack in einer Mulde auf der nur einen tausendstel Millimeter großen Alge. Während an Land verschiedene Pflanzenarten wie Erbse, Bohne oder Klee von Symbiosen mit Stickstoff-fixierenden Bakterien profitieren, ist die neue Lebensgemeinschaft die erste bekannte ihrer Art im Meer. Sie spielt eine wichtige Rolle bei der Düngung der Weltmeere mit Stickstoffverbindungen. Außerdem ist sie ein mögliches Modell für die ersten Symbiosen von Zellen mit Cyanobakterien, aus denen die Chloroplasten in Pflanzenzellen hervorgegangen sind.

(Science, 21.September 2012)

Algen der Gattung *Nannochloris*. Sie ähneln den Arten, mit denen manche Cyanobakterien eine Symbiose eingehen.



Fotos: Bart von Stratum (oben), Daniel Vaulot, Station Biologique, Roscoff, France (unten)

Knochengerüst **mit Ecken und Kanten**

Von künstlichem Knochen würden Patienten mit Osteoporose ebenso profitieren wie solche mit schweren Verletzungen oder Knochenkrebs. Unter welchen Bedingungen sich Knochengewebe optimal züchten lässt, erforschen **Peter Fratzl**, **John Dunlop** und **Wolfgang Wagermaier** am **Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung** in Potsdam-Golm.

TEXT **KLAUS WILHELM**

Knochen stehen für Härte und Stabilität, dennoch herrscht ständig Bewegung in ihnen – zumindest biologisch. Bei ihren mechanischen Eigenschaften denkt man vielleicht eher an einen leblosen, robusten, simpel aufgebauten Werkstoff. Doch Knochen sind unfassbar komplex und viel dynamischer als alle künstlichen Materialien, die Ingenieure ersonnen haben. „Das ist eine echte Herausforderung für einen Materialwissenschaftler, aber das reizt uns ja auch“, meint Peter Fratzl, Direktor am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung im brandenburgischen Potsdam-Golm.

„Wir wollen sehr genau wissen, was im Knochen vor allem bei der Heilung nach einem Bruch abläuft“, erklärt der gebürtige Wiener. Das vielfältige Interesse lässt sich schon daran ermessen, dass sich mit den knöchernen Details in der Abteilung „Biomaterialien“ des Golmer Max-Planck-Instituts eine bunte Mannschaft aus Physikern, Biologen, Chemikern, Materialwissenschaftlern, Mathematikern und Informatikern beschäftigt.

Das Team verfolgt mit seinen grundlegenden Studien das praktische Ziel, „dass unser Wissen von Ärzten mittel- bis langfristig für die Patienten angewendet wird“. Fratzl denkt an Leute mit Knochendefekten, die eine bestimmte Größe überschreiten und die Selbstheilungskräfte des Knochens überfordern – etwa nach schweren Verletzungen, bei Knochenkrebs oder bei chronischen Erkrankungen wie Osteoporose.

TISSUE ENGINEERING ERFÜLLT DIE HOFFNUNGEN NOCH NICHT

Stichwort Osteoporose (siehe Kasten Seite 53): Der Wissenschaftler berichtet von vielen älteren Menschen mit Oberschenkelhalsbrüchen, deren Knochen nur noch sehr langsam heilen. Was Folgeprobleme hervorruft: zum Beispiel lange Liegezeiten mit der Gefahr, dass sich chronisch offene Wunden entwickeln. So kann ein Oberschenkelhalsbruch, der vielleicht harmlos erscheint, letztlich tödlich enden. „Dass wir diesen Patienten vielleicht eines Tages helfen können, das motiviert uns reichlich.“ Und die Kooperationspartner der Golmer ebenso, vor allem Experten des Julius Wolff Instituts der Charité – Universitätsmedizin Berlin.

Erste Ergebnisse haben Peter Fratzl und seine Mitarbeiter bereits erzielt. So haben sie herausgefunden, dass Zellen Sagenhaftes können: die Krümmung einer Oberfläche ertasten, die viel größer

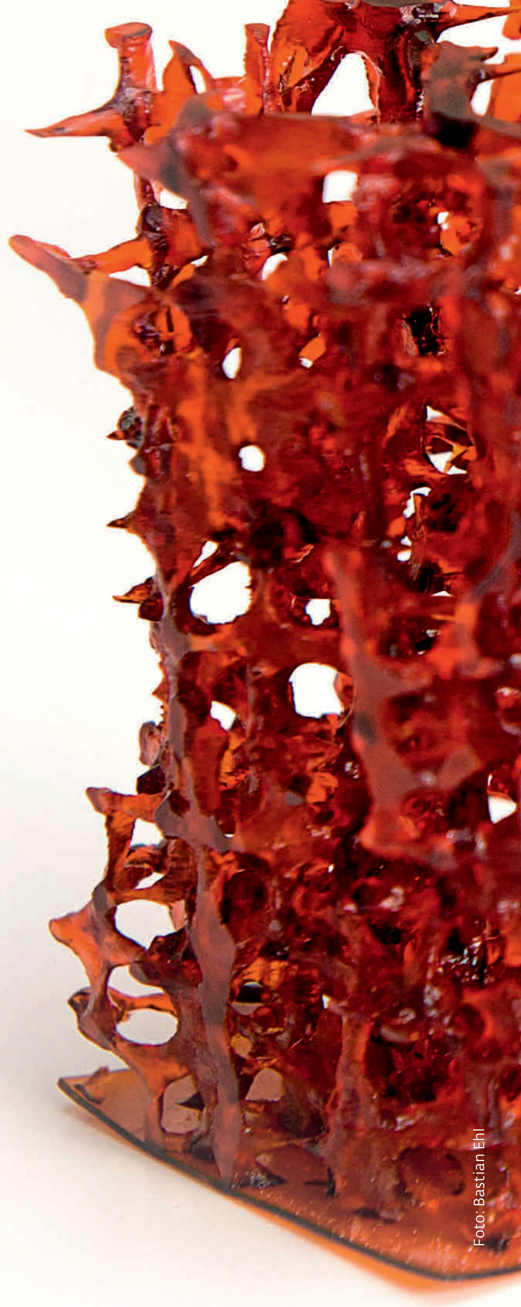
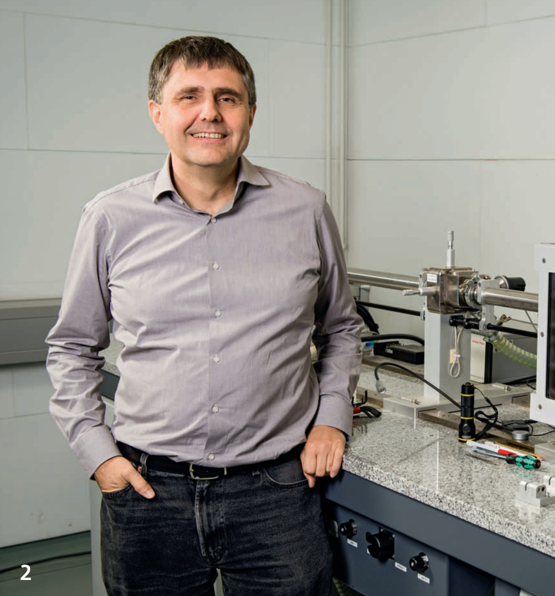


Foto: Bastian Ehl



An den natürlichen Grenzen des Wachstums: Mithilfe dieser 3D-Kopien menschlicher Knochenstruktur untersuchen Materialwissenschaftler, wie sich die Krümmung der Oberfläche auf die Vermehrung von Knochenzellen auswirkt. Wie die Forscher vermuten, wächst die schwammartige Struktur nicht komplett zu, weil ihre mittlere Krümmung null ist. So bleibt Platz für das Knochenmark.





1 | Detailanalyse: Wolfgang Wagermaier untersucht mittels einer Röntgenkleinwinkel-Anlage die Nanostruktur einer Probe. Er will herausfinden, unter welchen Bedingungen sich Knochengewebe mit der natürlichen Mikrostruktur züchten lässt.

2 | Kampf gegen Osteoporose: Direktor Peter Fratzl hofft, dass seine Forschung eines Tages Menschen mit Knochenschwund bei der Heilung von Brüchen helfen kann.

3 | Die Golmer Wissenschaftler gießen Knochenproben in Kunststoff, um sie zu stabilisieren und weiterzubearbeiten. Für ihre Untersuchungen verwenden sie Ratten- und Schafknochen.

4 | Auch eine Art von Knochenjob: Die Proben stellen die Forscher mit einer Knochensäge her.

ist als sie selbst. Und dass allein die Geometrie von Oberflächen das Wachstum knochenbildender Zellen entscheidend beschleunigen kann.

Derlei Erkenntnisse können dazu beitragen, die Züchtung von Knochen im Sinne des Tissue Engineering zu optimieren – mit diesem plakativen Schlagwort wurde in den 1990er-Jahren einer der großen Hoffnungsträger der modernen Medizin benannt. Das Versprechen war seinerzeit groß: Beliebiges Gewebe werde man in spätestens zwanzig Jahren im Labor aus einzelnen Zellen züchten können. Es schien idealer Ersatzstoff für Gewebe, das im Zuge verschiedener Erkrankungen verloren geht – zum Beispiel Herzgewebe für Patienten nach einem Herzinfarkt oder eben Knochengewebe für Leute mit Osteoporose bei schwer heilbaren Brüchen.

Die Erforschung von Stammzellen aus Embryonen oder aus Geweben von Erwachsenen befeuerte die Vision zusätzlich, denn diese Zellen mit ihrer Vielseitigkeit sind möglicherweise der ideale Rohstoff für die Züchtung von Gewebe. Seither haben Ärzte ihren Patienten Zellen und Gewebe, die mittels verschiedener Verfahren hergestellt wurden, verabreicht. Vor allem Knorpel wird heute auf diesem Wege ersetzt. „Aber die großen Hoffnungen haben sich noch nicht erfüllt", sagt Peter Fratzl und beklagt, „dass die Anwendung oft schneller ging als das Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse".

WIE KNOCHENZELLEN SICH AUF OBERFLÄCHEN VERHALTEN

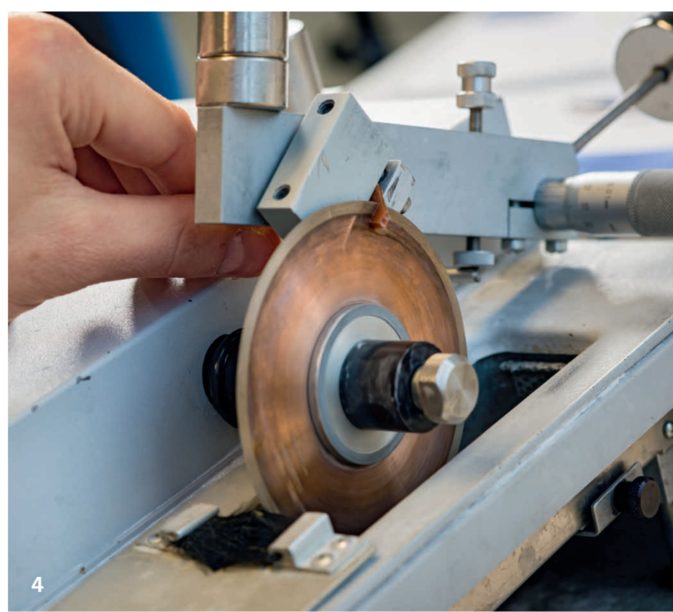
Die Erfolge seien auch deswegen bescheiden, weil die Forschung die Wechselwirkungen der beteiligten Zellen untereinander und mit den Zellzwischenräumen, der extrazellulären Matrix, nicht verstanden hat. Aber „das ist ein Riesending", urteilt der Max-Planck-Direktor und betont, dass die Fachleute aus Golm erst einmal einen Schritt zurückgegangen seien. Sie widmen sich mit Experimenten in der Zellkultur, mit physikalischen Messmethoden und mit Computersimulationen den Grundlagen eines wichtigen Teilbereichs des Tissue Engineering: dem Verhalten der Zellen auf einer Oberfläche, genauer gesagt: dem Gerüst, auf dem sie sich bei der Züchtung künstlichen Gewebes vermehren.

Die Forscher untersuchen zudem, welche Oberflächenformen Osteoblasten am besten wachsen lassen. Und wie sich die mechanischen Eigenschaften von Knochen, abhängig von den eingelagerten Mineralpartikeln, verändern. Grundlage, um diese Fragen beantworten zu können, ist das genaue Verständnis, wie Knochen nach einem Bruch im Detail heilt – ein weiteres Forschungsthema am Golmer Max-Planck-Institut. Das Ziel: optimale Bedingungen für die Zellen zu schaffen, damit sie rasch funktionsfähiges Gewebe für die Patienten bilden.

Dass bestimmte biochemische Signalstoffe die Vermehrung von Zellen stimulieren, ist lang bekannt. Diese Wachstumsfaktoren werden Patienten in hohen Dosen in den Körper gespritzt, um die Knochenheilung anzuregen. „Das ist der klassische Ansatz, im Sinne eines chemischen Wirkstoffs als Medikament", sagt John Dunlop. Die Zellen registrieren die

Fotos: Bastian Ehl (2)





biochemische Botschaft der Wachstumsfaktoren und setzen ihre Maschinerie in Gang, um sich zu teilen. Allerdings sind die langfristigen Nebenwirkungen gefährlich und unberechenbar – etwa die Entstehung von Tumoren.

Wachstumsfaktoren geben Forscher auch zu knochenbildenden Stammzellen in die Nährlösungen, um die Zellen zu vermehren und dann an einem Gerüst aus Kunststoffen oder anderen Materialien dreidimensional gedeihen zu lassen. Dabei reagieren die Zellen irgendwie mit der Oberfläche des Gerüstmaterials – und auf sie. „Deshalb gibt es auch physikalische Randbedingungen für das Wachstum von Knochengewebe“, sagt Fratzl. Zu Knochenzellen etwa entwickeln sich Stammzellen nur auf harten Oberflächen; auf weichen werden sie zu Nervenzellen.

Schon der Umstand, dass die zellulären Multitalente auf mechanisch verschiedenen Oberflächen unterschiedliche Funktionen entwickeln, zeigt: Eine Zelle kann Kräfte und die mechanischen Eigenschaften der Umgebung – ob sie sich etwa auf einer harten oder weichen Oberfläche befindet – regelrecht fühlen, ertasten. Die Zellen antworten also allein auf die mechanischen Informationen, die von ihrer Hülle, ihrer Membran, über bestimmte Proteinkomplexe nach innen weitergeleitet werden.

Im Inneren der Zelle reagieren daraufhin die „Muskeln“ der Zelle, sogenannte Aktinfilamente, die sich in Anpassung an die äußeren Signale ständig

DAS SKELETT UNTER STÄNDIGER RENOVIERUNG

Das menschliche Skelett besteht aus gut 200 Knochen – die genaue Zahl lässt sich nicht bestimmen, weil manche Knochen im Laufe des Lebens zusammenwachsen. Ihr Aufbau ist komplex. Aus Sicht eines Materialwissenschaftlers ist Knochen zunächst einmal ein Komposit – ein Verbundwerkstoff aus mehreren Materialien. Unterhalb der Knochenhaut liegt eine dicke Schicht dichten Knochengewebes, die im Inneren übergeht in ein schwammartig aufgebautes Gerüstwerk feiner Knochenbälkchen (Spongiosa). Die Konstruktion ist stabil und dennoch leicht.

Die eigentliche Knochensubstanz besteht aus unterschiedlichen Knochenzellen (Osteozyten). Diese sind eingebettet in eine Matrix, welche aus calciumhaltigem Hydroxylapatit, Eiweißen wie länglichen Kollagenmolekülen (Fibrillen), Wasser, Mineralpartikeln und anderen Substanzen besteht. Vor allem die Mineralpartikel wie Calcium machen den Knochen fest und hart.

Im Knochengewebe herrscht niemals Ruhe. Täglich baut es sich um, abgenutzte Substanz wird durch neue ersetzt. Zusammenwirkende Hormone, Vitamine und Botenstoffe regulieren die nicht endenden Bauarbeiten. Den eigentlichen Job verrichten die knochenaufbauenden Osteoblasten und die knochenabbauenden Osteoklasten. Die Umbauprozesse haben System und erfolgen abhängig davon, wie ein Knochen beansprucht wird. Richard Weinkamer vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung hat das in einer Computersimulation verfolgt. Demnach fühlen Knochenzellen (Osteozyten) in der Matrix die Art der mechanischen Beanspruchung und geben gemeinsam ein Signal, sodass die neue Knochensubstanz auf die häufigste mechanische Belastung abgestimmt ist. Bewegung ist übrigens das Beste für die Knochen. Bis etwa zum dreißigsten Lebensjahr produzieren die Knochen in der Summe mehr Masse, als sie abbauen. Danach geht im Zuge der Alterung mehr verloren, als gewonnen wird.





Das Wachstum der Osteoblasten hängt von der Krümmung der Oberfläche ab: Je stärker diese in einer Pore ist, desto schneller bauen die Zellen Gewebe an.

umbauen. So verändert sich die Form der Zelle im Raum. Das bekommt die Schaltzentrale der Zelle im Zellkern mit. Hier werden jetzt bestimmte Gene aktiviert, die der Zelle sagen: „Teile und vermehre dich!“ Oder: „Alles bleibt so, wie es ist.“ Oder auch: „Stirb!“

Weil die Zellen eines Gewebes über den Zellzwischenraum mittels direkter Kontaktstellen in Verbindung stehen, können sie mechanisch mit ihren Nachbarn kommunizieren und so ihr Verhalten aufeinander abstimmen. Auf diese Weise entstehen Verhaltensmuster von Zellverbänden. Genau diese Dynamik von Zellverbänden interessiert die Potsdamer Forscher.

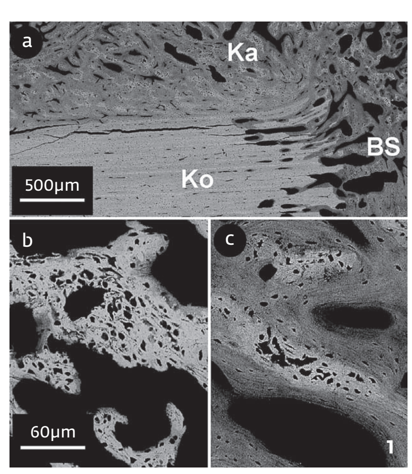
Materialwissenschaftler Wolfgang Wagermaier untersucht, wie das Knochengewebe bei seiner Heilung derlei Prozesse nutzt – anhand fixierter Proben von Ratten- und Schafknochen. Nach einem Bruch wächst um die Bruchstelle ein fibrinhaltiges, weiches und klumpiges Gewebe: der Kallus – „eine Art natürliche Schiene, die die beiden Knochenenden miteinander verbindet“, wie Wagermaier sagt. In diesem Kallus, hat der Forscher gezeigt, läuft die Knochenheilung in zwei Stufen – und zwar genauso wie bei der täglichen Neubildung von Knochen (siehe Kasten Seite 51).

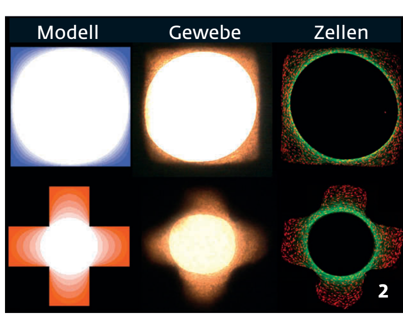
Im ersten Schritt wandern in den Kallus Osteoblasten, die trotz der weichen Umgebung zügig einen einfachen, relativ ungeordneten Knochen bilden. „Wir haben weiter gefunden, dass die Osteoblasten dieses erste Gerüst nutzen, um sich zu organisieren“, erklärt Wagermaier. Sie besiedeln die Oberflächen, kommunizieren untereinander mit mechanischen Signalen, bilden flache dreidimensionale Strukturen. Sie machen jetzt schon einen

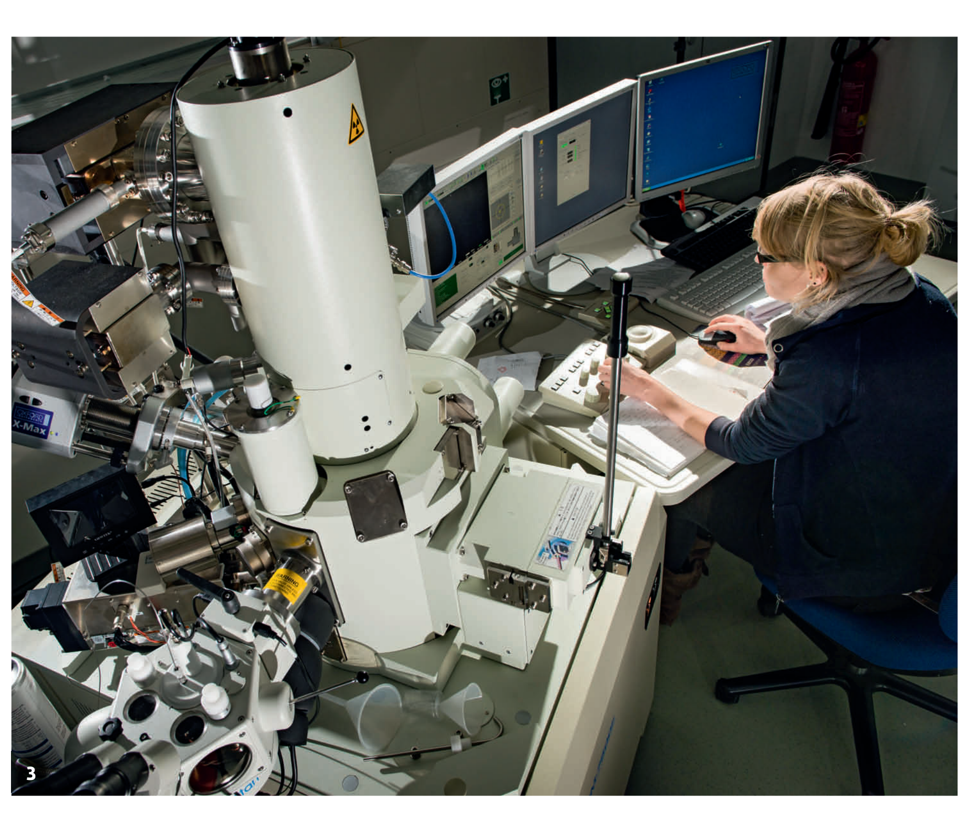
1 Die Etappen der Knochenreparatur: Bei der Heilung eines Bruches entsteht um die Bruchstelle (BS) der Kallus (Ka). Die Aufnahme mit einem Elektronenmikroskop erfasst den Bruch nach neun Wochen am äußeren Kortex (Ko) des Knochens. Im Kallus entwickelt sich in den ersten beiden Wochen zunächst ein wenig geordneter Knochen (b), an dem sich später gebildete Knochenlamellen ausrichten (c). Dunkelgraue Bereiche zeigen kürzlich gebildete Knochenstrukturen, die hellen Areale stellen vor Längerem entstandenes Gewebe dar.

2 Theorie und Experiment im Vergleich: Die Vorhersagen des von den Wissenschaftlern entwickelten Modells für zwei Porenformen (links) stimmen mit dem tatsächlichen Gewebewachstum der Zellkulturen (Mitte) überein. Bei Betrachtung mit dem Konfokalmikroskop (rechts) zeigt sich, dass Zellen in kreuzförmigen Poren deutlich mehr Aktinfilamente (grün) ausbilden als in quadratischen.

3 Die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung decken die Geheimnisse des Knochenwachstums unter anderem mithilfe eines Elektronenmikroskops auf.

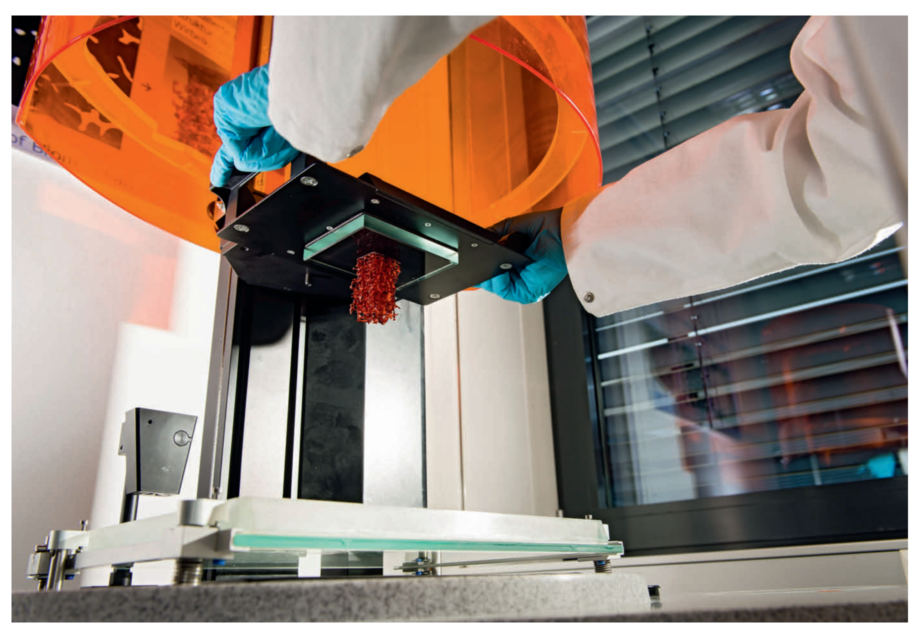






Fotos: Bastian Ehl (großes Bild), MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung (kleine Bilder, 2)





Modell nach Wunsch: Mittels Rapid Prototyping (rechts) lässt sich eine Knochenstruktur dreidimensional ausdrucken. Im selben Verfahren entstehen die Gerüste, auf denen die Forscher Knochenzellen züchten (oben).

mechanisch viel besseren Knochen als zuvor: einen lamellaren Knochen. Er ist hoch orientiert und entsprechend stabil gebaut. „Die Organisation und die Kooperation entscheiden“, fügt Fratzl hinzu, „den Osteoblasten ist es nicht egal, ob sie sich in einem reinen Bluterguss befinden oder in einer 3D-Situation, in der sie von ihren Vorgängern produzierte feste Oberflächen finden.“

Um dem Knochen die Geheimnisse seiner Dynamik zu entlocken, nutzt Wagermaier alle möglichen Verfahren, wie etwa Hightech-Mikroskopie und Spektroskopie, aber auch großes Gerät. Gerade bereitet er wieder einen Versuch im Synchrotron-Speicherring in Berlin-Adlershof vor, wo er die Mineralpartikel in Knochenproben analysiert. Sie sind die kleinsten Teile im Knochengewebe. Der Materialwissenschaftler verfolgt die verschiedenen Stadien der Heilung und sieht, wie Ausrichtung und Größe der Mineralpartikel die mechanische Qualität des Knochens prägen. Oder wie sich die interne Struktur des Knochens und der Knochenzellen verändert, wenn an diesen gezogen wird oder wenn sie sich selbst an einer Oberfläche verankern und Kraft ausüben. Auch die dabei gewonnenen Erkenntnisse dienen eines Tages letztlich der optimierten Züchtung von Knochen.

Bereits jetzt verwendet John Dunlop die Ergebnisse, um seine Experimente zu gestalten oder zu verfeinern. Der Australier beschäftigt sich am Golmer Max-Planck-Institut damit, wie die Feinstruktur eines künstlichen Gerüsts beim Tissue Engineering aussehen sollte, damit sich möglichst rasch mechanisch einwandfreies Knochengewebe bildet. Dunlops Arbeitsgruppe verwendet dazu das Rapid Prototyping. Mit diesem Verfahren lassen sich zum Beispiel Gerüste

DICHTER KNOCHEN IST NICHT IMMER GUT

Gerät der ständige Auf- und Abbau von Knochen im höheren Alter zunehmend aus dem Gleichgewicht, droht dem Körper Knochenschwund (Osteoporose). Im Wesentlichen handelt es sich dabei um eine Störung des Knochenumbaus. Davon betroffen sind in Deutschland knapp acht Millionen Menschen – meist Frauen nach den Wechseljahren. Weil ihre Knochenmasse weniger dicht ist, wächst das Risiko eines Bruchs schon bei geringen Belastungen.

Die Dichte des Knochens – seine Quantität – lässt sich leicht messen. Nicht so die Qualität des Knochens, die man nur bestimmen kann, wenn Patienten einer Biopsie unterzogen werden. Die Golmer Wissenschaftler sind Experten in puncto Qualitätsmessung und haben in klinischen Studien neuer Osteoporose-Medikamente vor allem zusammen mit dem Wiener Ludwig-Boltzmann-Institut für Osteologie getestet, ob die Präparate die Qualität neu gebildeten Knochens mindern.

Ein Knochen ist dann qualitativ gut, wenn die nur drei Nanometer dünnen Mineralplättchen parallel zu den Kollagenfibrillen ausgerichtet sind, und zwar innerhalb und an der Oberfläche der Kollagenfibrillen. Zudem machen Mineralien in einem normalen Knochen 30 bis 40 Prozent seines Volumens aus. Die Studienresultate zeigen, dass die heute häufig verabreichten Bisphosphonate der Knochenqualität auch nach zehn Jahren Behandlung in den meisten Fällen nicht schaden. Die heute nicht mehr eingesetzten Fluorpräparate erhöhten zwar die Dichte des Knochens, beeinträchtigten aber seine Qualität. Bei der Behandlung mit strontiumhaltigen Präparaten wird dieses calciumähnliche Element in das Knochenmineral eingelagert und dort gespeichert, was aber die mechanische Qualität des Knochenmaterials nicht beeinflusst.

Fotos: Bastian Ehl (2)



1 | Diskussionsstoff: John Dunlop (links) und Richard Weinkamer besprechen die 3D-Computersimulation eines Knochens.

2 | Die Aufnahme der Röntgenkleinwinkel-Anlage enthüllt, wie stark das Knochengewebe nach drei Monaten mineralisiert ist. Im Falschfarbenbild sind hoch mineralisierte Bereiche blau dargestellt; zur orangen Färbung hin nimmt die Mineralisierung ab. Die Richtung einer Linie gibt die vorherrschende Orientierung der Mineralpartikel an dieser Stelle wieder, und die Linienlänge zeigt, wie hoch der Anteil der so ausgerichteten Teilchen ist. (Ein Strich der Länge $\rho = 1$ steht dafür, dass alle Teilchen parallel liegen.) Die Zahlen im Bild geben die Dicke der Mineralpartikel in Nanometern wieder.

aus Kunststoff oder anderen Materialien am Computer entwerfen und formgetreu dreidimensional ausdrucken. „Damit können wir die Oberfläche des Materials haargenau nach unseren Wünschen variieren“, erklärt Dunlop.

Sein Team hat sich also Gerüste bauen lassen mit verschieden geformten Poren von je etwa einem Millimeter Durchmesser. Die Formen der Querschnitte reichten vom Dreieck über das Sechseck bis zum Kreis. Da aber alle Porenöffnungen denselben Umfang besaßen, ergab sich in den verschiedenen Formen auf derselben Strecke ein kompletter Umlauf von 360 Grad. Alle Poren wiesen somit dieselbe mittlere Krümmung auf.

Auf diesen Gerüsten siedelten die Wissenschaftler in einer Versuchsreihe immer wieder Osteoblasten an und warteten ein paar Wochen. „Die Ergebnisse sind verblüffend“, sagt Dunlop. Wie er und sein Team feststellten, erkennen die nur einen Mikrometer großen Osteoblasten irgendwie die Krümmung einer Fläche, die etwa tausendmal größer ist als sie selbst. Das ist so, als könnten wir allein mit dem Tastsinn unserer Füße ermitteln, ob und wie stark eine fußballfeldgroße Fläche gebogen ist. „Und die Zellen können sogar Winkel messen“, fügt Dunlop hinzu und staunt darüber immer noch.

Offenbar beruht das geometrische Gespür der Zellen darauf, dass sich ihre Aktinfilamente genau nach den mechanischen Belastungen ausrichten, denen die Zelle unterliegt. So orientieren sie sich in den Versuchen der Golmer Forscher entlang der Oberflächen der Poren. Dort verankern sich Gruppen von Zellen und üben mithilfe ihrer Muskeln Kräfte aus – sie ziehen an der Oberfläche und an ihren Nachbarn. Auf diese Weise können sie ihre Entfernung zueinander messen und mit diesen Daten die Krümmung der Oberfläche erschließen. Aber nicht jede Zelle hat derart sagenhafte mechanische Fähigkeiten, wie Dunlop in Versuchen gesehen hat. Aus Stammzellen differenzierte Fettzellen beispielsweise ziehen nicht an ihrer Umgebung, Bindegewebszellen dagegen sehr wohl.

John Dunlops Gruppe fand auch heraus, wie das Wachstum der Osteoblasten von der Krümmung der Oberfläche abhängt. Auf konvexem, also nach außen gewölbtem Untergrund wachsen die Zellen gar nicht, und für nach innen gewölbte Flächen gilt: „Je stärker die Krümmung in einer Pore, desto schneller bauen sie Gewebe an“, erklärt der Chemiker. Auf ebenem Gelände vermehren sich die Zellen kaum, und auch in den Ecken sechseckiger Poren gedeiht das Gewebe viel langsamer als in den Winkeln drei- oder viereckiger Hohlräume. Da in dem Golmer Experiment alle Poren im Mittel jedoch gleich stark gekrümmt waren, füllten sie sich unterm Strich auch im selben Tempo mit den Knochenzellen.

Mesenchymale Stammzellen, die sich in Richtung Knochenzellen weiterentwickeln, verhalten sich genauso wie die Osteoblasten. Vermutlich sind die Prinzipien für Knochenzellen universell.

„Die einfache Beziehung zwischen der mittleren Krümmung und der Wachstumsrate der Knochenzellen ist aus anderen Zusammenhängen wie etwa der Bildung von Seifenblasen bekannt“, sagt John Dunlop. „Festzustel-

Fotos: Bastian Ehl (links), MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung (rechts)

len, dass so ein einfaches Gesetz auch in einem ganz anderen Bereich gilt, war ein großer Moment in meiner bisherigen Forschung." Anhand ihrer Erkenntnisse können die Forscher nun Gerüste mit optimaler Geometrie entwickeln, um künstliches Knochengewebe zu züchten. So lässt sich das Wachstumstempo gegenüber bisher üblichen Gerüsten verdoppeln – ohne dass Wachstumsfaktoren benutzt werden müssen. Ein paar Hinweise können die Golmer Forscher bereits geben. Die Poren des Gerüstmaterials sollten etwa 50 bis 100 tausenstel Millimeter groß sein – mit so vielen Winkeln wie nur möglich. Kreuzförmige Poren könnten als erste Annäherung dienen.

DIE OBERFLÄCHE IST NUR AM ANFANG ENTSCHEIDEND

Aus welchen biologischen Gründen starke Krümmungen die Knochenzellen besonders zur Teilung anspornen, können die Forscher allerdings noch nicht im Detail erklären. „Die Oberflächen der Gerüste, die sich nach einem Bruch im Körper bilden, sind sehr rau, weisen also viele Krümmungen auf", erklärt John Dunlop. Bisher wissen Forscher darüber kaum mehr: Die genauen geometrischen Verhältnisse, unter denen Knochenzellen in Organismen wachsen, sind schwierig zu untersuchen. Daher gibt es dazu noch keine befriedigenden Daten.

Die Oberfläche des Gerüsts ist jedoch nur ganz am Anfang des Knochenwachstums entscheidend, wie John Dunlop festgestellt hat. Nachdem sich die ersten Zellschichten gebildet haben, spielt es kaum noch eine Rolle, aus welchem Material das Gerüst gebaut ist und welche Topografie es besitzt.

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen haben die Forscher ein mathematisches Modell entwickelt, mit dem sie immer neue Formen der Poren in Gerüsten testen, um irgendwann einen optimierten Prototyp zu präsentieren. „Wir wollen den ganzen Prozess rationalisieren", sagt Peter Fratzl, „wir sind mittendrin und kommen gut voran." Bisher berücksichtigt das Tissue Engineering zwar noch keine geometrischen Aspekte bei der Herstellung von Gerüsten, aber der Max-Planck-Direktor ist zuversichtlich: „In absehbarer Zeit werden unsere Kooperationspartner die Erkenntnisse im Tiermodell testen." Und irgendwann am Menschen. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Mit dem Studium der Faktoren, die das Knochenwachstum beeinflussen, versuchen Forscher die optimalen Bedingungen zu finden, um künstliches Knochengewebe zu züchten.**
- **Knochenzellen registrieren die Härte und Geometrie einer Oberfläche mithilfe ihrer Aktinfilamente.**
- **Wie gut sich Osteoblasten vermehren, hängt am Anfang des Knochenwachstums unter anderem von der Geometrie der Oberfläche ab – je stärker gekrümmt diese ist, desto schneller teilen sich die Zellen.**

GLOSSAR

Aktinfilamente: Aus dem Strukturprotein Aktin aufgebaute, fadenförmige Strukturen. Sie stabilisieren als Bestandteile des Zytoskeletts die Zellen und sind am Stofftransport in der Zelle ebenso beteiligt wie an der Kontraktion der Muskeln.

Fibrin: Ein Protein, das bei der Blutgerinnung polymerisiert und eine Wunde verschließt.

Mesenchymale Stammzellen: Vorläuferzellen des Bindegewebes, die sich in eine Vielzahl von Zellen differenzieren können. Aus ihnen können beispielsweise Osteoblasten entstehen.

Osteoblasten: Knochenbildende Zellen, die ständig Knochen aufbauen und bei der Heilung von Knochenbrüchen eine wichtige Rolle spielen.

Osteoporose: Eine Krankheit, bei der Knochen im Alter anfälliger für Brüche werden. Sie entsteht, wenn Knochensubstanz zu rasch abgebaut wird, weshalb die Knochendichte sinkt und die Struktur der Knochen sich ändert.



Faszinierende Laufleistung

MotionBLITZ® LTR4 portable

Mobiles High-Speed System für Langzeitaufnahmen

- Zur Analyse durchgängiger Versuchsreihen und lang andauernder Prozesse
- Bis zu 36 Minuten Daueraufnahmen bei 2336 x 1728 Pixel und 549 fps
- Echtzeit-Festplatten-Aufzeichnung
- Hohe Lichtempfindlichkeit: 1.600 ASA monochrom 1.200 ASA RGB
- Benutzerfreundliche MotionBLITZ® Director2 Software



Mikrotron GmbH
Landshuter Straße 20–22
85716 Unterschleissheim
Tel. +49 (0) 89-72 63 42-00
info@mikrotron.de
www.mikrotron.de



Quellcode des Lebens

Eine Biologievorlesung hat **Eugene W. Myers** nie besucht. Trotzdem hat er auf diesem Gebiet Karriere gemacht und mit einem Computerprogramm maßgeblich zur Entschlüsselung des menschlichen Erbguts beigetragen. Seit Kurzem ist der Bioinformatiker Direktor am **Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik** und am Zentrum für Systembiologie in Dresden.

TEXT **ELKE MAIER**



Er hat an der Sequenzierung des menschlichen Genoms entscheidend mitgewirkt: Eugene W. Myers, neuer Direktor am Dresdner Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik.



Foto: Sven Döring

» Erst seit etwa zehn Jahren können Wissenschaftler jedes beliebige Protein sichtbar machen und im Mikroskop live verfolgen, was in einer lebenden Zelle passiert.

Eugene W. Myers sitzt konzentriert vor dem Bildschirm, die Brille auf die Stirn geschoben. Eine Mail muss noch verschickt werden, dann ist Myers ganz für seinen Besuch da. Sein schlichtes Büro liegt im zweiten Stock des Dresdner Max-Planck-Instituts für molekulare Zellbiologie und Genetik. Die Nachricht, die er eben tippt, ist für Klaus Tschira in Heidelberg bestimmt.

Gemeinsam mit der Klaus Tschira Stiftung und der Max-Planck-Förderstiftung hat die Max-Planck-Gesellschaft das neue Zentrum für Systembiologie ins Leben gerufen, an dem Eugene – „Gene" – W. Myers seit einem halben Jahr Direktor ist. Das Zentrum ist ein Gemeinschaftsprojekt der Dresdner Max-Planck-Institute für molekulare Zellbiologie und Genetik sowie für Physik komplexer Systeme. Es soll Methoden entwickeln, um damit die Abläufe in der belebten Natur besser zu verstehen.

Jeans, weißes Hemd, dazu ein schwarzes Jackett, grau melierte, gewellte Haare und dunkle Augen: Äußerlich erinnert Gene Myers ein wenig an den Hollywood-Schauspieler Richard Gere. Berühmt ist er auch – nicht auf der Leinwand, aber in der Bioinformatik. Der US-Amerikaner ist einer der Pioniere in dieser Disziplin. Er hat die Entschlüsselung des menschlichen Genoms um die Jahrtausendwende herum entscheidend vorangebracht. Die Software BLAST, die er 1990 mitentwickelte, benutzen Forscher in aller Welt, um DNA-Sequenzen miteinander zu vergleichen. Er wurde bereits mehrfach ausgezeichnet, darunter mit dem Max-Planck-Forschungspreis 2004; außerdem hat ihn das Magazin GENOME TECHNOLOGY zum einflussreichsten Bioinformatiker ernannt.

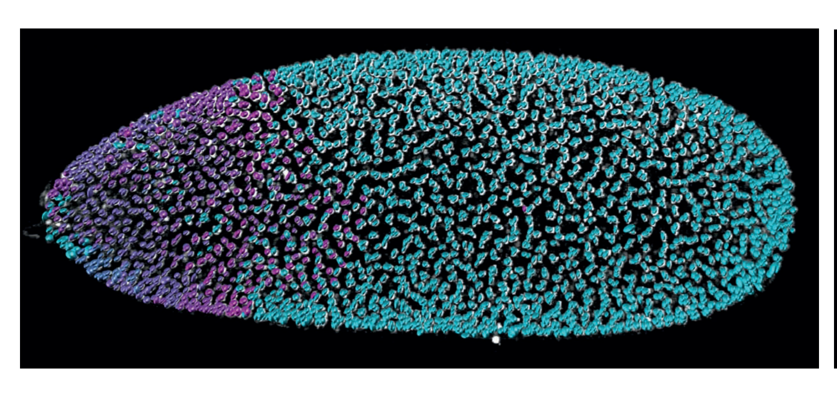
VON DER SEQUENZANALYSE ZUR MIKROSKOPIE

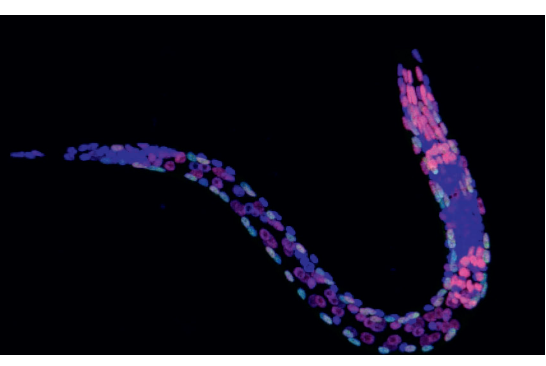
Gene Myers ist leidenschaftlicher Kaffeetrinker. Folgerichtig schlägt er die Cafeteria im Foyer des Instituts vor, wo er sich einen Cappuccino holt und an einem der metallenen Bistrotische Platz nimmt. In das Gesagte streut er hin und wieder deutsche Ausdrücke ein und betont es durch eine lebhafte Gestik, besonders dann, wenn er von etwas begeistert ist. Und das ist er oft – wenn er etwa erklärt, wie er, der sich jahrelang mit der Sequenzanalyse beschäftigt hatte, zur Mikroskopie gekommen ist.

„Das war 2003 bei einem Besuch am Max-Planck-Institut", sagt er und nippt an seinem Cappuccino. „Tony Hyman zeigte mir Filmaufnahmen einer sich teilenden Zelle. Ich konnte genau beobachten, wie sich der Spindelapparat ausbildete und die Chromosomenhälften gleichmäßig auf die beiden Tochterzellen verteilte. Ich fand das faszinierend", schwärmt er. „Man konnte das Wachstum der röhrenförmigen Spindelproteine sehen, jeden einzelnen Mikrotubulus. Ich wusste bis dahin gar nicht, was man mit einem Mikroskop alles sehen kann!"

Solche Aufnahmen sind noch nicht so lange möglich. „Erst seit ungefähr zehn Jahren sind wir in der Lage, jedes beliebige Protein in einer Zelle mithilfe von Fluoreszenzfarbstoffen sichtbar zu machen", sagt Myers. Die Wissenschaftler können damit im Mikroskop live verfolgen, was in einer lebenden Zelle passiert.

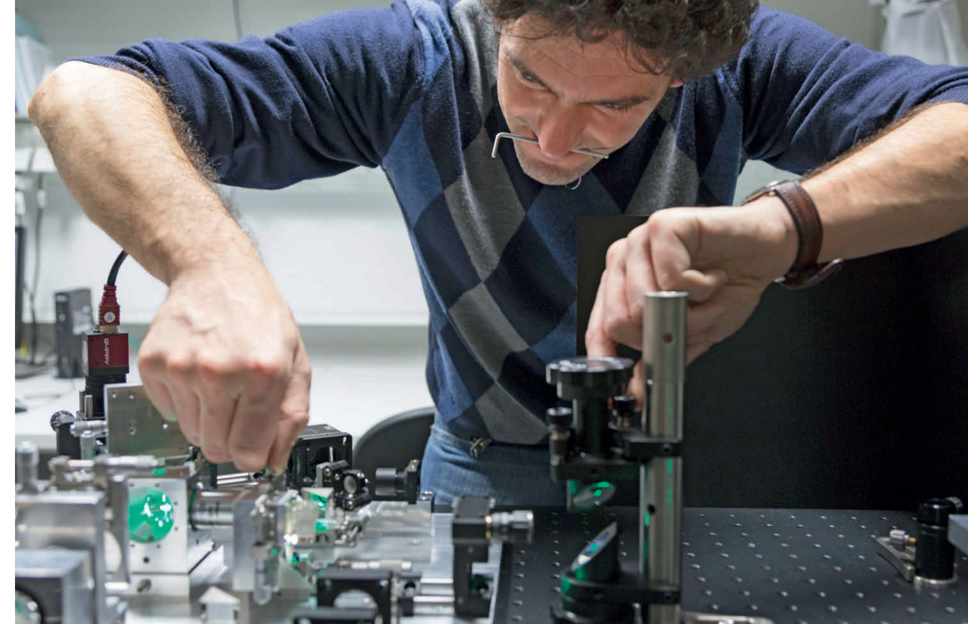
Für Gene Myers, der damals an der University of California in Berkeley ar-





Anhand von Zellverbänden, wie hier an einem *Drosophila*-Embryo (links) oder an der Larve des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* (rechts), können die Forscher den Verlauf der Zellteilungen oder die Genexpression genau verfolgen.

Foto: Gene Myers (2)



oben: Mikroskope nach Maß. Gene Myers und seine Mitarbeiter entwickeln in Dresden gleich zwei Mikroskope. Für die bestmögliche Auflösung tüftelt der Wissenschaftler Nicola Maghelli noch an den optimalen Einstellungen.

unten: Im Optikraum diskutieren Gene Myers und Nicola Maghelli darüber, wie der Anregungsstrahlengang eingestellt werden soll – eine Frage, die sichtlich Kopfzerbrechen bereitet.

Fotos: Sven Döring (2)

beitete, war der Film der Dresdner Forscher ein Schlüsselerlebnis. Bis dahin hatte er sich vor allem mit dem Buchstabencode des Genoms beschäftigt und Computerprogramme für den Vergleich von Gensequenzen entwickelt. Von nun an richtete er seinen Fokus auf das, was in diesem Code festgeschrieben ist. „Ich will wissen, wie das Erbgut die vielfältigen Formen des Lebens hervorbringt“, sagt er. „Wie bestimmen etwa die Gene, wie das Gehirn der Fruchtfliege *Drosophila* verschaltet ist und wie es funktioniert?“

3D-BILDER AUS UNZÄHLIGEN EINZELAUFNAHMEN

Das Fruchtfliegengehirn ist gerade mal einen drittel Millimeter groß. Trotzdem besteht es aus 100 000 Nervenzellen. Es erfordert einen enormen Aufwand, solche winzigen Strukturen zu untersuchen – spezielle, hochauflösende Mikroskope und ausgeklügelte Algorithmen, um unzählige Einzelaufnahmen zu einem dreidimensionalen Bild zu verrechnen.

Zwei Jahre waren beispielsweise notwendig, bis Gene Myers und seine damaligen Kollegen am Howard Hughes Medical Institute in den USA ein Multiphotonenmikroskop entwickelt hatten, um damit das Gehirn einer Maus komplett zu untersuchen. „Was früher eineinhalb Jahre gedauert hatte, ging



nun in sechs Tagen – und noch dazu mit viel schärferen Bildern“, sagt Myers.

Mit dieser Erfahrung will er nun am Dresdner Institut gleich zwei hochauflösende Mikroskope entwickeln: eines, um die Vorgänge im Zellinnern sichtbar zu machen, und ein anderes, um Gruppen von Zellen zu untersuchen. „Damit können wir dann zum Beispiel ganz genau verfolgen, was im *Drosophila*-Embryo passiert“, erklärt der Wissenschaftler. „Wie kommunizieren die Zellen untereinander? Wie arbeiten sie zusammen, damit eine Fliege entsteht?“

DEN ORGANISMUS ALS GANZES VERSTEHEN

Es ist dieser interdisziplinäre Forschungsansatz, den Organismus als Ganzes zu verstehen, den Myers am Dresdner Institut so schätzt. „Außerdem bietet die Max-Planck-Gesellschaft ihren Wissenschaftlern die Freiheit, etwas Neues auszuprobieren und dabei auch Risiken einzugehen“, sagt er. Letztendlich ist es aber nicht allein das Forschungsumfeld gewesen, das ihn nach Deutschland gelockt hat. „Dresden ist wunderschön, und meiner Frau und mir gefallen die Kultur und die Lebensart.“

Lange Spaziergänge am Elbufer mit seinem Bordercollie-Mischling Poème gehören für ihn genauso dazu wie der tägliche Weg mit dem Fahrrad zum Institut. Wichtig sind Gene Myers aber auch die Freundschaften zu seinen Dresdner Forscherkollegen, die sich im Laufe der Zeit über die Wissenschaft hi-

Gemeinsam mit seiner Sekretärin Sabine Jochen bespricht Gene Myers das Programm für den Tag. Trotz seines vollen Terminkalenders möchte er genügend Zeit für seine Mitarbeiter haben und auch selbst mitanpacken.

Fotos: Sven Döring

» Im Jahr 1979 gab es für die Bioinformatik noch gar keinen Namen, das Fach steckte in den Kinderschuhen. Gene Myers sollte entscheidend dazu beitragen, dass sich das änderte.

naus entwickelt haben. Der Begriff Freundschaft taucht während des Gesprächs immer wieder auf – vielleicht das Erbe einer rastlosen Kindheit.

Geboren wurde Gene Myers in Boise im Bundesstaat Idaho, doch schon bald ging es in die weite Welt. Sein Vater hatte eine Stelle beim Ölkonzern Exxon und arbeitete in verschiedenen Ländern Asiens. Die Familie – seine Mutter, eine gebürtige Französin, seine ältere Schwester und sein jüngerer Bruder – war immer dabei.

„Meinen ersten Geburtstag habe ich auf einem Schiff auf dem Weg nach Karatschi gefeiert, mein Bruder kam in Indien zur Welt", beschreibt er seine abenteuerliche Kindheit zwischen Pakistan, Indien, Indonesien, Hongkong und Japan. „Wir blieben nie länger als zwei oder drei Jahre an einem Ort. Immer wieder die Brücken zu seinen Freunden abbrechen zu müssen, das war schon hart." Dafür hat er aber Einblicke in verschiedene Kulturen und Lebensweisen bekommen und gelernt, sich an neue Lebensumstände anzupassen.

Sehr früh schon zeigte der mittlere Spross der Familie eine ausgeprägte Vorliebe für Zahlen. Kaum beherrschte er im Alter von vier Jahren die Ziffern, begann er, die Zahlen von 1 bis 1000 aufzuschreiben. Das Talent des kleinen Gene blieb jedoch zunächst unerkannt. „In meinen Schulzeugnissen steht, ich hätte eine Begabung für Kunst. Von Mathematik ist keine Rede."

Mathematik war sein Lieblingsfach, doch darüber hinaus entwickelte er ein vielseitiges Interesse für die Naturwissenschaften. „Ich habe alles Mögliche gelesen, zum Beispiel den Biochemiker und Science-Fiction-Autor Isaac Asimov", erzählt er und rührt in seinem zweiten Cappuccino. Großen Eindruck machte auf ihn auch *Gray's Anatomy,* ein Standardwerk der Anatomie. Mit zwölf wusste er, dass er Forscher werden wollte.



Deutschstunde: Mit seinem Lehrer Klaus Thiel vom Goethe-Institut übt Gene Myers den Gebrauch des Genitivs. Sich in seiner neuen Heimat bald auf Deutsch verständigen zu können, ist ihm wichtig.

Foto: Sven Döring

ALS MATHEMATIKSTUDENT ZWEI SEMESTER ÜBERSPRUNGEN

Gegen Ende seiner Highschool-Zeit kehrte die Familie zurück in die USA. Zum Studium schrieb sich Gene Myers am renommierten California Institute of Technology für Mathematik ein und übersprang gleich die ersten zwei Semester. Als weiteres Fach fiel die Wahl auf Elektrotechnik. Einer der Scheine, der dafür vorgesehen war, steht allerdings bis heute aus: „Ich hätte einen Kurs in Rhetorik belegen sollen, war aber zu schüchtern, um vor Publikum zu reden", erzählt er und schmunzelt. „Außerdem dachte ich damals, dass ich das als Wissenschaftler später ohnehin nicht brauchen würde." Ein Irrtum, wie er inzwischen weiß. Aber auch ohne Rhetorikkurs gelingt es ihm heute mühelos, Menschen für seine Ideen zu begeistern.

Mit der Bioinformatik kam Gene Myers erstmals 1979 während seiner Doktorarbeit bei Andrzej Ehrenfeucht an der University of Colorado in Kontakt. „Damals gab es aber gar keinen Namen dafür, das Fach steckte noch in den Kinderschuhen", sagt Myers. Er selbst sollte schon bald entscheidend dazu beitragen, dass sich das änderte.

Im Jahr 1985 – Gene Myers war inzwischen Assistant Professor an der University of Arizona – entwickelte er ein Programm zum Vergleich von Textdateien, als ein Kollege auf die Idee kam, dass sich etwas Ähnliches auch für den Buchstabencode der DNA eignen könnte, und damit seine Begeisterung

oben: Traute Zweisamkeit. Während Gene Myers abends noch über einem Programmcode grübelt, hat es sich Bordercollie-Mischling Poème auf dem Sofa gemütlich gemacht.

unten: Porträt eines Weltenbummlers. Das Bild zeigt Gene Myers auf dem Arm seines Kindermädchens Lilly in Kalkutta. Einen Großteil seiner Kindheit verbrachte er in verschiedenen Ländern Asiens, wo sein Vater für den Ölkonzern Exxon arbeitete.



für die Bioinformatik weckte. Aber der Grund, an einem biologischen Thema zu arbeiten, war dabei nicht allein wissenschaftlicher Natur: „Anders als bei den Informatikern gab es bei den Biologen immer was zu feiern", sagt Myers mit einem verschmitzten Lächeln. „Wir hatten viel Spaß!"

Er begann, eng mit Webb Miller von der Penn State University und David Lipman, Direktor am damals neuen National Center for Biotechnology Information, zusammenzuarbeiten. Die Kooperation legte den Grundstein für die Software BLAST. Seit deren Veröffentlichung im Jahr 1990 wurde das im Internet frei verfügbare Programm rund 40000-mal zitiert und gehört damit zu den meistzitierten wissenschaftlichen Arbeiten. Sogar in die Laborsprache hat BLAST Einzug gehalten: Wenn Biologen damit am Rechner DNA-Sequenzen vergleichen, dann sprechen sie von „blasten".

Über die DNA-Analyse landete Gene Myers schließlich bei dem bisher spannendsten Projekt seiner Forscherkarriere: der Sequenzierung des menschlichen Genoms. Allein dessen Größe von 3,2 Milliarden Basenpaaren stellte die Forscher vor eine riesige Herausforderung. Denn lange DNA-Stränge lassen sich nicht am Stück entschlüsseln. Meist wird die Sequenz schon nach etwa 800 Basen zu ungenau oder bricht ab. Die Wissenschaftler müssen sich daher Schritt für Schritt vorarbeiten.

DIE AUFGABE: EIN PUZZLE MIT 50 MILLIONEN TEILEN

Am schnellsten gelingt das mithilfe des sogenannten Shotgun Sequencing, bei dem die DNA vervielfältigt und anschließend – wie bei einem Schrotschuss – in kleine Schnipsel zerstückelt wird. Diese werden dann sequenziert und anschließend am Rechner wieder zusammengesetzt. Wie bei einem Puzzle ist aber auch hier die Aufgabe umso schwieriger, je mehr Teile vorhanden sind. Das Erbgutpuzzle des Menschen hatte rund 50 Millionen Teile.

Fotos: privat (2)

» Dank des Programms von Myers und der Shotgun-Methode konnte die Sequenzierung Jahre vor dem gesetzten Termin abgeschlossen werden und kostete dabei nur ein Zehntel.

„Als wir den Vorschlag machten, das menschliche Genom im Shotgun-Verfahren zu sequenzieren, hielten das die meisten für eine Schnapsidee“, erinnert sich Gene Myers. 2000 DNA-Schnipsel galten damals als Obergrenze, alles andere werde die Computerkapazität übersteigen. Ein Artikel, in dem er das Verfahren vorstellen wollte, fiel dementsprechend bei den wichtigsten Fachzeitschriften NATURE und SCIENCE durch. Die Zeitschrift GENOME RESEARCH war zwar zu einer Veröffentlichung bereit, allerdings nur unter der Bedingung, einen kritischen Artikel gegenüberzustellen.

Einer, der von Anfang an fest an das Shotgun-Verfahren glaubte, war Craig Venter. Als er 1998 seine Firma Celera gründete, die parallel zum öffentlich geförderten *Human Genome Project* an der Sequenzierung des menschlichen Erbguts arbeitete, bot er Gene Myers eine Stelle an. Nun musste Myers beweisen, dass seine Methode nicht nur in seinen Computersimulationen funktionierte, sondern auch in der Realität. „Das war die stressigste Zeit in meinem Leben, aber auch die aufregendste“, erinnert er sich.

Der Erfolgsdruck war enorm, denn viele Hundert Millionen Dollar standen auf dem Spiel. Gene Myers arbeitete wie besessen, endlose Zeilen Computercode mussten geschrieben werden. Aber er hielt durch. Dank seines Programms und der Shotgun-Methode konnte die Sequenzierung Jahre vor dem gesetzten Termin abgeschlossen werden und kostete nur ein Zehntel der geplanten Summe. Spätestens jetzt waren auch die letzten Zweifler verstummt.

Nun ist Myers dabei, in Dresden eine neue Forschungsgruppe aufzubauen: Vier Postdocs und eine Doktorandin arbeiten schon bei ihm, für weitere ist noch Platz. Zu sehr will er allerdings nicht expandieren, denn ihm ist es wichtig, in die Arbeit jedes Einzelnen involviert zu bleiben. „Zwölf wäre eine gute Größe“, meint er daher.



Besuch im Weißen Haus: Das Bild zeigt Gene Myers (Dritter von links) gemeinsam mit Samuel Broder, ehemals Direktor am National Cancer Institute, dem Biochemiker und Nobelpreisträger Hamilton Smith sowie Craig Venter, Gründer der Firma Celera (von links).

Foto: privat

PROGRAMME SCHREIBEN AUS LEIDENSCHAFT

Als jemanden, der nur vom Schreibtisch aus die Geschicke seiner Mannschaft leitet, kann man sich Myers auch gar nicht vorstellen. Zu sehr ist er ein Macher, der gern selbst anpackt. Trotz seiner vielen Aufgaben programmiert er immer noch so oft wie möglich selbst: gleich morgens nach dem Aufstehen, bei der obligatorischen Tasse Cappuccino, zwischendurch auch mal nachts oder im Flugzeug. „Ich liebe es einfach, Programmcodes zu schreiben!“

Noch eine letzte Tasse, dann muss Gene Myers zum nächsten Termin. „Eine Arbeitsgruppe zusammenzustellen, unser Leben in Dresden zu organisieren – das alles ist schon sehr aufregend“, meint er abschließend. Momentan leben er und seine Frau Daphne aus dem Koffer, bis ihr neues Domizil an der Elbe bezugsfertig ist. Und dann ist noch ein Bau in Planung: Er soll neben dem Institut für Zellbiologie und Genetik entstehen und das Zentrum für Systembiologie mit seinen drei Arbeitsgruppen beherbergen.

In diesem Winter will sich Gene Myers dann eine kleine Auszeit in den kanadischen Rocky Mountains gönnen. Tiefschneefahren ist seine Leidenschaft. Vielleicht, weil es damit ein bisschen so ist wie mit der Wissenschaft: Auch hier kann man unberührtes Terrain betreten und Spuren hinterlassen. ◂



Foto: istockphoto

Haut mit hohem **Rostschutzfaktor**

Korrosion verzehrt in den Industrienationen jährlich bis zu vier Prozent der Wirtschaftsleistung. Substanzen, die Metalle wirkungsvoll vor ihrem zerstörerischen Werk schützen, belasten oft die Umwelt oder haben andere Nachteile. Daher entwickeln Wissenschaftler um **Martin Stratmann** und **Michael Rohwerder** am **Max-Planck-Institut für Eisenforschung** in Düsseldorf Kunststoffschichten, die etwa Stähle vor Rost bewahren und sich selbst heilen, wenn sie beschädigt werden.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Erin Brockovich hat die Welt mit einem Problem bekannt gemacht, das Forscher des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung nun endlich lösen wollen. In Brockovichs Geschichte geht es um Gift, viel Geld und die Gesundheit von fast 2000 Menschen; und es ist die Geschichte einer Frau, die viel dazu beigetragen hat, einen mächtigen Konzern in die Knie zu zwingen. Diese Zutaten ergaben die Mischung, die auch Hollywood gerne verarbeitet. Dass im Film *Erin Brockovich* Julia Roberts die amerikanische Rechtsanwaltsgehilfin und Umweltaktivistin spielt, dürfte dem Problem wohl zusätzliche Aufmerksamkeit verschafft haben: dem krebserregenden Chrom VI.

Der kalifornische Energiekonzern Pacific Gas and Electric Company ließ die Substanz zwischen 1952 und 1966 ins Grundwasser der Stadt Hinkley gelangen. Dafür musste das Unternehmen 1996 am Ende eines Verfahrens, das Erin Brockovich vorangetrieben hatte, rund 200 Millionen Dollar an die Einwohner der Stadt und noch einmal 133 Millionen Dollar an die Anwälte zahlen.

Die Salze von Chrom VI setzen beim Korrosionsschutz immer noch Maßstäbe, sind jedoch für viele Anwendungen inzwischen verboten. Gesucht ist nun eine ebenso wirkungsvolle, aber umweltverträgliche Alternative. Denn Korrosion frisst in den Industrienationen jährlich drei bis vier Prozent des Bruttoinlandsproduktes auf – das sind allein in Deutschland mehr als 75 Milliarden Euro. Den Prozess, der vor allem metallische Werkstoffe zersetzt, erforschen Martin Stratmann und Michael Rohwerder am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf, und sie suchen nach Mitteln, ihn zu verhindern.

Das Ziel der Forscher sind Kunststoffschichten, die verschiedene Metalle, aber vor allem Stahl oder Aluminium, vor Korrosion schützen und wie die Haut von Lebewesen von selbst heilen, wenn sie verletzt werden. Solch eine Kunststoffschicht soll – meist unter einem Farblack – ein Bollwerk gegen den zerstörerischen Fraß am Metall bilden. Bei den meisten Stählen errichtet eine Zinkschicht direkt auf dem Blech eine weitere Barriere. Bei Aluminium besteht sie aus einer besonders widerstandsfä-

Das soll künftig nicht mehr passieren: Eine umweltverträgliche Kunststoffschicht, die vor Korrosion schützt und sich selbst heilt, soll Rost verhindern.

Foto: Frank Vinken

Korrosionsschutz in Schichten: The Hai Tran trägt mit einer rotierenden Scheibenelektrode Zink auf eine Stahlprobe auf, die dann mit einem Polymer überzogen wird.





1 Ein Blick, der unter die Haut geht: Ashokanand Vimalanandan justiert die Kelvinsonde, mit der er verfolgen kann, ob eine Polymerschicht vor Korrosion schützt und Schäden heilt.

2 Eine feine Nadel dient als Elektrode der Kelvinsonde, die über der Probe positioniert wird. Bei der dunklen Schicht handelt es sich um die selbstheilende Haut. Unter dem Tropfen befindet sich ein Defekt, in dem es zur Korrosion kommt.

higen, dichten Oxidschicht. Werden die Schutzschichten und möglicherweise sogar das Metall darunter durch einen Kratzer beschädigt, soll die Kunststoffhaut die Korrosion eventuell gemeinsam mit dem Zink zunächst stoppen. Und zwar so lange, bis sie die Wunde im Werkstoff wieder versiegelt hat.

NUTZT ZWEI BRANCHEN: ERST BESCHICHTEN, DANN FORMEN

Ein solcher Überzug würde nicht nur das Chrom-VI-Problem beseitigen, sondern könnte noch mit weiteren Vorteilen auftrumpfen. So soll es die Kunststoffhaut Stahlherstellern ermöglichen, die Zinkschicht zumindest zu reduzieren. Denn auch Zink ist in mancher Hinsicht umstritten. „Die Zinkschicht kann sich zwar in gewissem Maß selbst heilen, weil sich in Rissen oder Löchern auch passivierendes Zinkoxid abscheidet, das die weitere Korrosion verhindert“, sagt Michael Rohwerder, Leiter der Forschungsgruppe Molekulare Strukturen und Oberflächenmodifikation. „Aber das Metall gilt als problematisch für die Umwelt, ist teuer und verdampft beim Laserschweißen leicht, sodass die Schweißgeräte verunreinigt werden.“

Zudem könnten Beschichtungen, wie sie die Düsseldorfer Materialwissenschaftler entwickeln, den Wartungsaufwand für Flugzeuge minimieren. Feine Kratzer etwa in deren Tragflächen würde eine selbstheilende Schicht sofort verschließen. Heute müssen die Fluggesellschaften ihre Flieger regelmäßig nach noch so kleinen Schäden absuchen, um diese dann ebenso aufwendig zu reparieren.

Schließlich könnte mit der selbstheilenden Haut für Metalle ein neues Kapitel in der Fertigung von Autos oder Maschinen beginnen. Bisher werden Karosserien erst dann mit schützenden Schichten überzogen, wenn sie ihre endgültige Gestalt angenommen haben. Den Stahl vorher zu beschichten wäre kostengünstiger, bringt aber wenig, weil sich in der Schutzhaut feine Risse bilden, während das Material in Form gebracht wird. Eine selbstheilende Schicht könnte auch dieses Problem beheben. Einen Gewinn brächte das sowohl den Automobilherstellern und Maschinenbauern als auch den Stahlerzeugern. Erstere könnten sich einen aufwendigen Prozessschritt sparen, der nichts mit ihrem Kerngeschäft zu tun hat, während Letztere ihre Produkte wertvoller und einträglicher machen könnten.

Motive, selbstheilende Polymerschichten zu entwickeln, gibt es für Martin Stratmann und Michael Rohwerder also reichlich, allerdings müssen sie sich dabei auch zahlreichen Herausforderungen stellen. Um zu verstehen, worin die Schwierigkeiten liegen und mit welchen Kniffen die Düsseldorfer Wissenschaftler sie überwunden haben oder überwinden wollen, hilft ein kurzer Blick auf das, was bei der Korrosion passiert.

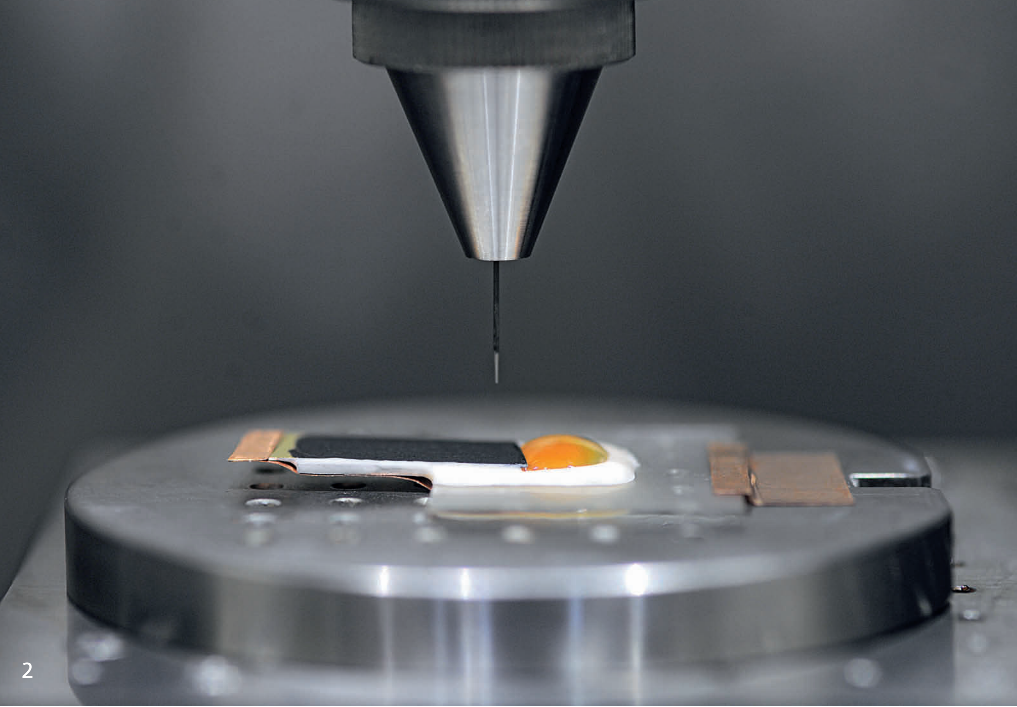
„Die Korrosion ist die Umkehrung der Metallurgie“, sagt Martin Stratmann, Direktor der Abteilung Grenzflächenchemie und Oberflächentechnik am Düsseldorfer Max-Planck-Institut: Abgesehen von den Edelmetallen kann sie alle Metalle befallen. Der prominenteste und ökonomisch relevanteste Fall dürfte das Rosten sein, bei dem Eisen von Sauerstoff oxidiert wird. Die Korrosion des Eisens macht also das Werk des Hochofens zunichte, der Eisenoxide und andere Erze in elementare Metalle verwandelt.

IONEN REGEN DEN APPETIT DES SAUERSTOFFS AN

In völlig trockener Luft würde Eisen jedoch nicht korrodieren. Zwar möchte der Luftsauerstoff das Metall auch unter diesen Bedingungen nur zu gerne anknabbern, doch das Eisen wird ohne Feuchtigkeit schnell unerreichbar für ihn, so als würde sich eine Dose mit Futter schließen, während ein Hund daraus frisst. Denn auf dem Metall bildet sich an der Luft schnell eine dünne Eisenoxidschicht. Und in trockener Atmosphäre ist der Sauerstoff nicht reaktiv genug, um diesen Überzug zu durchdringen.

Foto: Frank Vinken





2

Wenn Wasser, im schlimmsten Fall sogar salziges Wasser, ins Spiel kommt, ändert sich die Situation völlig. Dann bildet sich auf dem Eisen zum einen ein poröses, wasserhaltiges Gemisch verschiedener Oxide, die schichtweise abbröckeln und dem Sauerstoff so immer neue Nahrung auftischen. Zum anderen gibt es im Wasser, vor allem in salzigem Wasser, Ionen, die gleichermaßen appetitanregend und verdauungsfördernd für den Rostfraß wirken, weil sie dem im Wasser gelösten Sauerstoff den Angriff auf das Metall erleichtern. Ein Maß, wie anfällig ein Metall für die Korrosion ist, stellt das elektrochemische Potenzial dar. Je kleiner es ist, desto unedler ist das Metall, und desto leichter wird es dem Sauerstoff oder einem anderen Oxidationsmittel zur Beute.

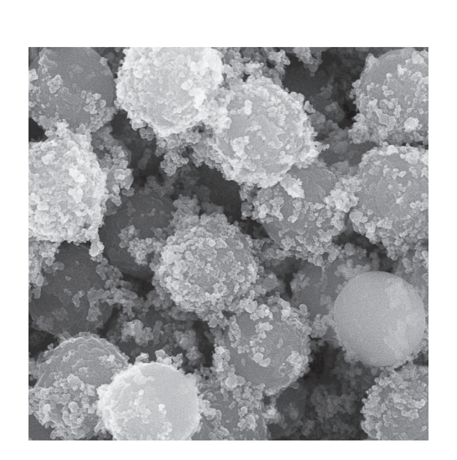
Nicht nur Eisen, sondern auch andere Metalle wie etwa Zink überziehen sich bei den ersten Angriffen des Sauerstoffs jedoch mit einer schützenden Schicht. Auf Zink bildet sich eine recht dicke Decke von Zinkoxid und -carbonat, die das Metall bei normaler Luftfeuchtigkeit sogar beständiger macht als das eigentlich edlere Eisen. Darauf beruht der Rostschutz verzinkter Bleche, aber nicht nur darauf. Weil Zink unedler ist als Eisen, korrodiert es zuerst, wenn das Blech angekratzt wird. Auf der schmalen freigelegten Fläche der etwa sieben Mikrometer dünnen Zinkschicht, die dem zerstörerischen Angriff ausgesetzt ist, kann das Oxid nicht die Struktur bilden, mit der es das Zink davor bewahrt, von der Seite aufgezehrt zu werden. So opfert sie sich im schlimmsten Fall völlig auf, um den darunterliegenden Stahl gegen die Korrosion zu verteidigen.

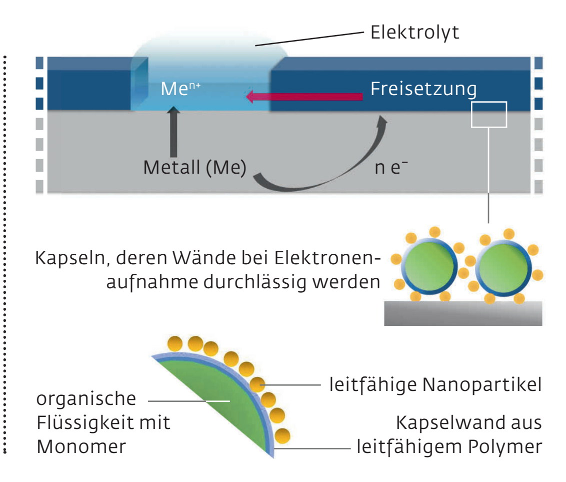
Mit einer Polymerhaut, die sich in umfassenderem Sinn selbst heilen kann als Zink, wollen die Düsseldorfer ihm das Opfer ersparen. Dabei bauen sie auf ihre Forschung an Kunststoffen, mit denen Materialwissenschaftler im Korrosionsschutz seit knapp 30 Jahren experimentieren: leitfähigen Polymeren. „Diese Materialien wurden auch schon früh kommerziell für den Korrosionsschutz verwendet, haben aber nicht richtig funktioniert, und die meisten Produkte sind vom Markt verschwunden", sagt Michael Rohwerder. „In einigen Fällen kam es durch diese Produkte sogar zu verstärkter Korrosion." Die Düsseldorfer Materialwissenschaftler haben viel zur Aufklärung beigetragen, wie die leitfähigen Polymere Rost verhindern – wenn sie es tun – und warum und unter welchen Bedingungen sie versagen.

DIE KELVINSONDE ZEIGT, WANN KORROSION EINSETZT

Martin Stratmann hat dafür ein probates Instrument entwickelt. Genauer gesagt: Er hatte die Idee, ein schon länger bekanntes Gerät genau dafür einzuset-

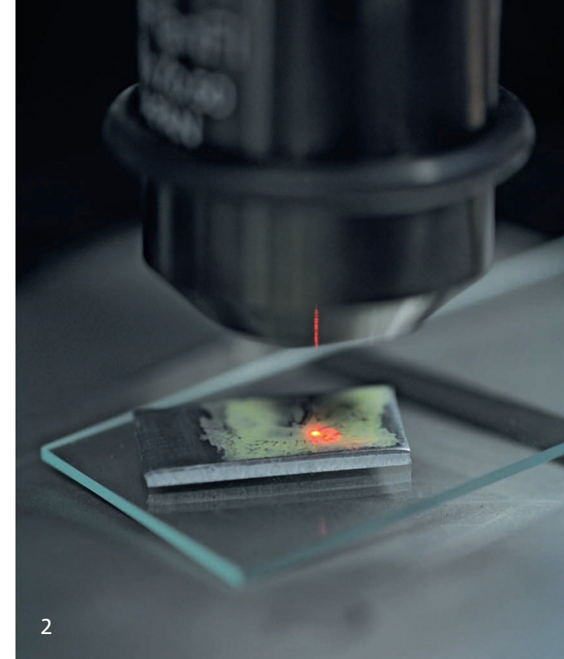
Fotos und Grafik: Frank Vinken (oben), MPI für Eisenforschung (unten, 2)





Himbeerpartikel nennen die Düsseldorfer Forscher die Kapseln, die Heilmittel für die Kunststoffschicht enthalten und auf ihrer Oberfläche leitfähige Nanopartikel tragen (Aufnahme eines Rasterelektronenmikroskops, links). Die Kapseln sind in einen elektrisch nicht leitenden Kunststoff (blau) eingebettet. Wie das Schema zeigt, nimmt das leitfähige Polymer der Containerwand Elektronen (e^-) auf, die das korrodierende Metall im Defekt abgibt. Daraufhin werden die Container durchlässig, und die Monomere des nicht leitenden Kunststoffs strömen in den Defekt, wo sie polymerisieren.





1 Auf ein Raman-Mikroskop setzen die Düsseldorfer Forscher, um die Polymerschicht in einem Kratzer zu charakterisieren. Das Instrument ermöglicht Aussagen über die Art der untersuchten Substanz.

2 Ob die Methode die gewünschten Informationen liefert, testen die Wissenschaftler an einer mit dem Kunststoff Polynorbornen beschichteten Zinkprobe.

zen – die Kelvinsonde. Mit seiner Glasfront erinnert das kastenförmige Gerät an eine Mikrowelle und ist auch ungefähr so hoch. Im Inneren befindet sich eine nadelförmige Elektrode, das Herzstück der Apparatur. Damit lässt sich in Form einer elektrischen Spannung messen, wie viel Arbeit aufgewendet werden muss, um Elektronen aus einer Oberfläche zu katapultieren. Diese Austrittsarbeit ist ein Maß für die chemischen Eigenschaften eines Metalls, bei unedlen Metallen etwa ist sie eher klein, bei edlen ziemlich groß. Und sie ändert sich, wenn sich die Oberfläche verändert, etwa wenn das Material anfängt zu korrodieren. Dann verzeichnet die Kelvinsonde einen drastischen Einbruch der Spannung. Umgekehrt schnellt die Spannung in die Höhe, sobald der Korrosionsschutz greift.

LEITFÄHIGE POLYMERE SCHÜTZEN NUR BEI KLEINEN SCHÄDEN

„Der Vorteil der Kelvinsonde liegt darin, dass wir mit ihr die Prozesse an der Metalloberfläche durch einen Feuchtigkeitsfilm hindurch verfolgen können“, sagt Martin Stratmann. Doch der Blick des Messgeräts durchdringt nicht nur einen Wassertropfen: „Irgendwann haben wir ohne große Erwartungen einfach mal durch ein Polymer auf das Metall geguckt“, sagt der Chemiker. Und die Forscher landeten einen Treffer in einem blinden Fleck der Materialwissenschaft. Denn die Kelvinsonde enthüllt auch zuverlässig, wenn unter einer Polymerschicht der Rost am Stahl nagt.

Mit dem Instrument durchleuchteten die Forscher systematisch verschiedene Beschichtungen, die leitfähige Polymere enthalten, und testen deren Korrosionsschutz unter wechselnden Bedingungen. Die Kunststoffe bestehen aus einem positiv geladenen Gerüst, das den Strom transportiert, und beweglichen negativen Ionen. Deren schützende Wirkung beruht den Untersuchungen der Max-Planck-Forscher zufolge darauf, dass sie ein höheres elektrochemisches Potenzial als etwa Eisen besitzen und mit diesem in einer elektrisch leitenden Verbindung stehen. Daher wirken sie nicht nur als Barriere wie jede andere Kunststoffhaut, sondern schützen das Metall auch aktiv. Wenn nämlich die Schicht beschädigt wird, passt sich das niedrige Potenzial des Metalls dem für die Korrosion unantastbaren Potenzial des Kunststoffs an – zumindest in der Theorie.

In der Praxis besteht der Schutz nur, solange die Haut nicht zu stark verletzt wird. Bei Kratzern, die breiter sind als einen Zehntelmillimeter, bleibt das Metall nicht mehr verschont. Bei den meisten Anwendungen ist ein Schutz, der nur bei Schäden mit weniger als einem halben Quadratmillimeter Fläche greift, nicht viel wert. Zudem scheitert das Polymer in chloridhaltigen Lösungen an seiner Aufgabe, weil diese die Korrosion besonders aggressiv vorantreiben. Das ist ungünstig, wenn die Kunststoffschichten im salzigen, also chloridreichen Meerwasser Schiffe und im Winter Autos vor Rost schützen sollen.

AKTIVE POLYMERSCHICHT SOLL DEN SCHUTZ NICHT SABOTIEREN

Besser schützen die Polymerschichten, wenn sie als mobile Teilchen etwa Phosphat-Anionen enthalten. Diese können mit den Ionen des korrodierenden Metalls einen Überzug bilden, der den Werkstoff gegen weitere Attacken des Sauerstoffs und seiner gedungenen Helfer abschirmt, und zwar auf ähnliche Weise wie Zinkoxid sein Muttermetall. Das setzt voraus, dass die Anionen bei einem korrosiven Angriff freigesetzt werden. Theoretisch ist das möglich. Denn unter diesen Bedingungen schnappt sich das Polymergerüst die Elektronen des Eisens, die eigentlich der Sauerstoff an sich reißen will. Es verliert dabei seine Ladung und seine Leitfähigkeit.

Die negativen Gegenionen brauchen nun einen anderen Ladungsausgleich und finden ihn in den positiven Ionen des korrodierenden Metalls. Wenn es gut läuft, wandern sie tatsächlich aus der Polymerschicht in den Kratzer und bilden im Fall von Stahl mit den Zink- oder Eisenionen die gewünschte Schutzschicht. Zu oft jedoch läuft es nicht gut. „Dann strömen die Metallionen wie über eine Autobahn in

Fotos: Frank Vinken (2)

das Polymer, sodass sich die Zerstörung des Metalls sogar beschleunigt", erklärt Michael Rohwerder.

So weit die eher durchwachsenen Nachrichten zum Korrosionsschutz mit einer Kunststoffhaut. Doch es gibt auch eine gute Nachricht: Die Düsseldorfer Max-Planck-Forscher weisen mit ihren Untersuchungen Wege zu einem Korrosionsschutz, der weniger wählerisch ist, wann er seine Pflicht erfüllt, und der vor allem unter keinen Umständen dem Gegner in die Hände spielt.

Die erste Spur legte die Beobachtung, dass die leitfähigen Polymere den Korrosionsschutz nur sabotieren, wenn sie ein Metall als geschlossene Schicht bedecken. Wenn die Materialwissenschaftler stattdessen kleine Knäuel der ionischen Polymere in einem elektrisch isolierenden Kunststoff verteilen wie Kirschen in einem Pfannkuchen, können die elektrisch leitenden Kunststoffe ihre Vorteile ausspielen, dienen den Metallionen aber nicht mehr als Schnellstraße auf dem Weg der Zerstörung. „Damit der Korrosionsschutz funktioniert, müssen wir darauf achten, dass die Polymerteilchen Kontakt zum darunterliegenden Metall und den passenden Abstand untereinander haben", so Rohwerder.

Von dieser Erkenntnis ist es nicht mehr weit bis zu der Idee, in die Schicht eines nicht leitenden Kunststoffs wie etwa des für Lacke verwendeten Polyurethans Kapseln einzubauen, die im Schadensfall die Bestandteile des Polyurethan-Überzugs freisetzen und die angekratzte Kunststoffschicht nicht nur provisorisch reparieren wie Zink. Daran arbeiten in Michael Rohwerders Gruppe die beiden Doktoranden The Hai Tran und Ashokanand Vimalanandan. Am Ende sollen die Schichten aus ihrem Labor Risse und Kratzer heilen, die mehr als einen Zehntelmillimeter breit sind.

„Um dieses Ziel zu erreichen, müssen wir die selbstheilende Schicht mit drei Eigenschaften ausstatten", erklärt The Hai Tran: „Sie darf die für die Selbstheilung nötigen Stoffe erst entweichen lassen, wenn Korrosion stattfindet." Zudem müssten die Substanzen bis zum Ernstfall stabil bleiben. „Wenn sie aber gebraucht werden, müssen die Kapseln sie zuverlässig freisetzen", ergänzt Ashokanand Vimalanandan. „Denn sie müssen in ausreichender Menge in den Defekt gelangen, damit dieser mit einer geschlossenen Schicht versiegelt wird."

ALS KAPSELWÄNDE EIGNEN SICH LEITENDE POLYMERE BESTENS

Auf der Suche nach den Systemen, die diese Anforderungen in verschiedenen Anwendungen optimal erfüllen, testen die beiden Wissenschaftler Kapseln mit vielfältigen Wandmaterialien in unterschiedlichen Kunststoffschichten. Die Kapseln liefern ihnen Forscher um Katharina Landfester am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz. Mal besitzen die Container die Form von Kugeln, mal eher die von Röhren. Manche bestehen aus Polymeren, die sich bei einer Änderung des pH-Wertes auflösen. Andere konstruieren die Mainzer Chemiker aus anorganischem Siliciumdioxid, das so lange von Spangen aus Schwefel zusammengehalten wird, bis diese durch eine Absenkung des Potenzials oder einen Anstieg des pH-Wertes geöffnet werden. Auch die leitfähigen Polymere entwickeln die Düsseldorfer zusammen mit den Mainzer Forschern weiter, um daraus die Kapselwände zu konstruieren.

Mögen elektrisch leitende Kettenmoleküle allein als Korrosionsschutz unvollkommen sein, als Wandmaterial der Container haben sie sich besonders bewährt. „Sie schließen die Bestandteile der Kunststoffschicht nicht nur dauerhaft ein", sagt Michael Rohwerder, „sie werden auch bei einer Potenzialänderung durchlässig." Genau die Änderung des elektrochemischen Potenzials hat sich als untrüglichstes Signal der Korrosion erwiesen.

Dieses Signal empfangen die Kapseln aber nur, wenn sie in elektrischem Kontakt mit dem darunterliegenden Metall stehen, bei dem es sich oft um Zink handelt. Dummerweise bildet sich aber zwischen einem leitfähigen Polymer und Zink leicht eine isolierende Schicht. „Um die elektrische Verbindung auch in

Forschung für ein neues Kapitel im Korrosionsschutz: Michael Rohwerder (links) und Martin Stratmann untersuchen, wie Metalle zersetzt werden und wie sich das verhindern lässt.



Foto: Frank Vinken

diesem Fall zu erhalten, umhüllen wir die Kapseln mit leitfähigen Nanopartikeln", erklärt Michael Rohwerder. Die Kapseln, die so entstehen, nennen die Forscher Himbeerpartikel, und bei einem Blick durch ein Mikroskop erweist sich das als vollkommen gerechtfertigt. Denn die Nanopartikel sitzen als winzige Kugeln auf den Behältern. Da zwischen ihnen und der Zinkunterlage keine isolierende Wand wächst, bleibt der elektrische Kontakt bestehen.

Allein mit Behältern, die bei Bedarf die Monomere der Kunststoffschicht abgeben, funktioniert die Selbstheilung aber noch nicht. Dafür fehlt noch ein Katalysator. Dieses chemische Hilfsmittel macht den Heilungsprozess erst möglich, weil es die Reaktion zwischen den Monomeren vermittelt. Der Katalysator muss zum einen getrennt von den Monomeren gespeichert werden, zum anderen bleibt er in der organischen Polymerschicht nicht stabil. „Wir speichern den Katalysator daher mit Siliciumoxid-Kapseln in der Zinkschicht", erklärt Vimalanandan. Die Katalysatorcontainer öffnen sich bei einer Veränderung des pH-Wertes, die ebenfalls auf einsetzende Korrosion hinweist.

WIE STRÖMT DAS HEILMITTEL IN DEN DEFEKT?

Ob und wie gut die Selbstheilung mit ihren verschiedenen Faktoren funktioniert, kontrollieren Ashokanand Vimalanandan und The Hai Tran vor allem, indem sie mit einer Raster-Kelvinsonde Punkt für Punkt über die Probe fahren. Gleich mehrere dieser Geräte stehen in ihrem Labor. „Damit sehen wir, ob das Loch geschlossen ist", sagt Vimalanandan. Das genügt den Forschern jedoch noch nicht. Den Fortschritt des Heilungsprozesses kontrollieren sie außerdem mit spektroskopischen Methoden, die etwa mit UV- und sichtbarem Licht arbeiten. „Leider können wir bislang noch nicht in den Defekt hineinschauen", sagt Tran, „aber wir testen derzeit verschiedene Methoden wie die Raman-Spektroskopie, damit sich das ändert."

Die umfassenden Studien belegen, dass sich die Zutaten für die Selbstheilung schon dauerhaft speichern und bei Bedarf zuverlässig freisetzen lassen. Zwei der drei Anforderungen erfüllen die selbstheilenden Schichten somit schon, nur bei der dritten hakt es noch: Bislang strömt nicht genug des Heilmittels in den Defekt, um einen mehr als 0,1 Millimeter breiten Kratzer zu schließen. Damit die Düsseldorfer Max-Planck-Forscher auch mit dieser Schwierigkeit fertig werden, müssen sie zunächst den Transport der Monomere durch die Beschichtung analysieren. „Die Schlüsselfrage ist dabei, wie genau das Polymer in den Defekt gelangt", sagt Michael Rohwerder.

Trotz der offenen Fragen ist der Forscher optimistisch, dass kleine Blechschäden irgendwann selbst heilen werden. „Die Chrom-VI-Beschichtungen wurden auch über Jahrzehnte hin entwickelt", sagt Rohwerder. „Dann können wir das nicht in wenigen Jahren schaffen." Und wenn dabei noch grundlegende Verständnislücken zu schließen sind, spornt das die Düsseldorfer Forscher umso mehr an. „Wir machen das schließlich nicht, um die Tagesprobleme der Industrie zu lösen", erklärt Martin Stratmann. „Wir wollen mit unserer Forschung das grundlegende Wissen über Korrosion und Korrosionsschutz voranbringen und schauen aus diesem Grund weit in die Zukunft." ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Korrosion wie etwa Rost richtet gewaltige Schäden an. Chrom-VI-haltige Verbindungen waren jahrzehntelang das Maß der Dinge im Korrosionsschutz, sind aber giftig und umweltschädlich.**
- **Mit selbstheilenden Polymerschichten versuchen Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung, die Korrosion von Metallen zu verhindern. Diese Schichten sollen sich von selbst regenerieren, wenn sie beschädigt werden.**
- **Die Haut für Metalle enthält Kapseln, welche die Komponenten des Kunststoffs dauerhaft speichern und sie bei einem Defekt zuverlässig freisetzen, und zwar in ausreichender Menge, um zurzeit Risse bis zu einem Zehntelmillimeter zu heilen. An der Selbstheilung größerer Defekte wird gearbeitet. Als Wandmaterial für die Container eignen sich leitfähige Polymere besonders gut.**

GLOSSAR

Elektrochemisches Potenzial: Es gibt an, wie leicht eine Substanz in wässriger Lösung Elektronen abgibt oder aufnimmt, und hängt unter anderem von der Ionenkonzentration und dem pH-Wert in der Lösung ab. Je niedriger das Potenzial, desto leichter wird ein Stoff – wie zum Beispiel ein Metall – oxidiert. Ein Vergleich elektrochemischer Potenziale verschiedener Substanzen ermöglicht eine Aussage, ob sie miteinander reagieren.

Kelvinsonde: Das Instrument misst mit einer Elektrode die Arbeit, die verrichtet werden muss, um Elektronen aus einer Oberfläche zu lösen. Mit der Kelvinsonde lässt sich Korrosion unter einer Flüssigkeit und sogar unter einer Kunststoffschicht detektieren.

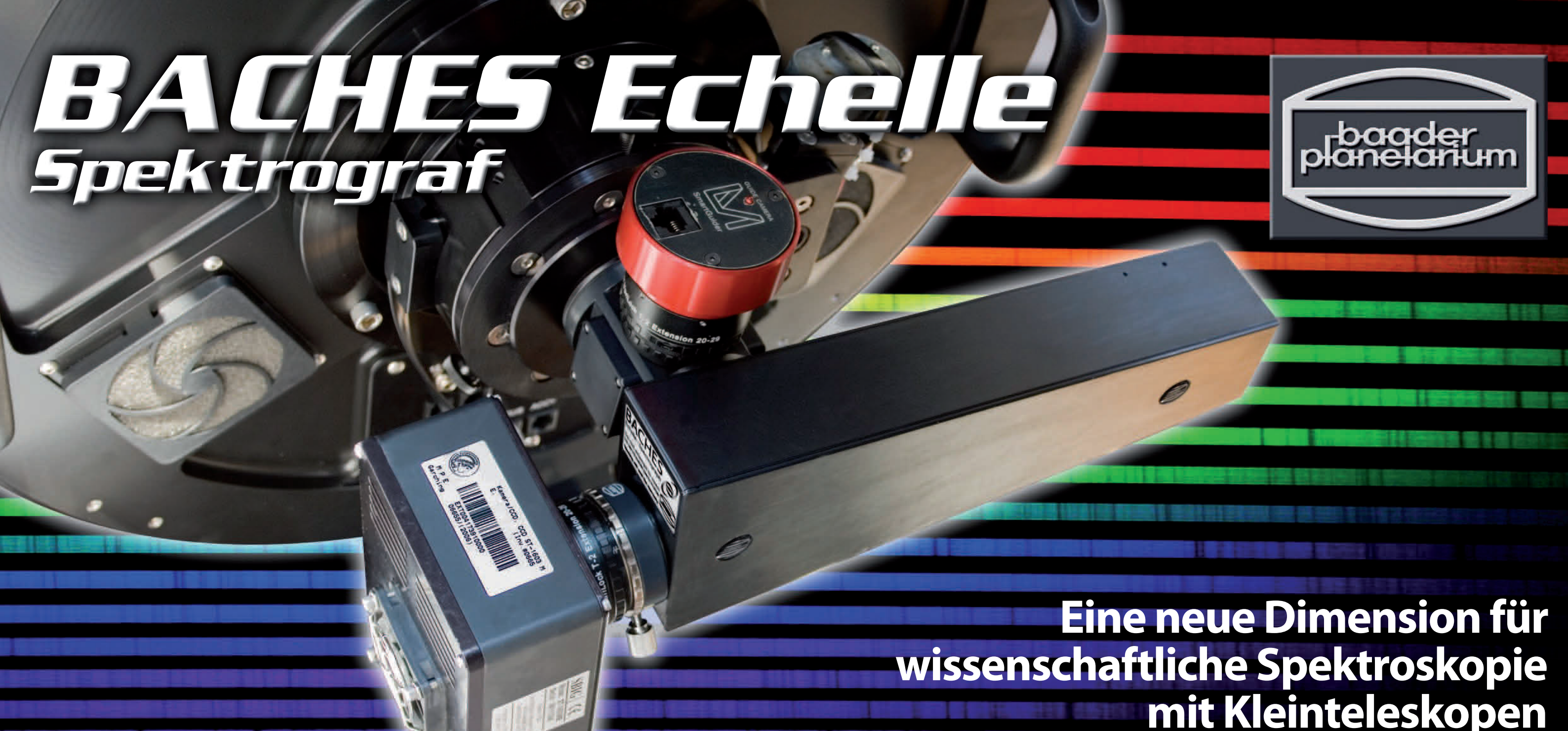
Passivierung: Auf Eisen bildet sich eine dünne Oxidschicht, die an der Atmosphäre nur einen geringen Schutz bietet, auf Zink bildet sich eine dickere oxid- und carbonathaltige Schicht, die für Sauerstoff undurchlässig ist und das Metall deutlich besser vor Korrosion schützt.

pH-Wert: Gibt den sauren oder basischen Charakter einer wässrigen Lösung auf einer Skala von 0 (sauer) bis 14 (basisch) an. Er ist definiert über den Logarithmus der Protonenkonzentration – je höher diese, desto saurer das Milieu und desto niedriger der pH-Wert.

Polymer: Ein Kettenmolekül, das aus zahlreichen gleichen Baueinheiten, den Monomeren, aufgebaut ist. Elektrisch leitende Polymere der Wissenschaftler bestehen aus einem positiv geladenen Gerüst und beweglichen, negativen Ionen.

Raman-Spektroskopie: Sie ermöglicht Aussagen über Art und Eigenschaften eines Materials. Sie beruht darauf, dass eine Probe mit Laserlicht bestrahlt wird, wobei die Schwingungs- und Rotationsenergie ihrer Moleküle sich in charakteristischer Weise ändern kann.

BACHES Echelle Spektrograf



Eine neue Dimension für wissenschaftliche Spektroskopie mit Kleinteleskopen

BACHES (lieferbar ab 2013)

Hochauflösender Echelle Spektrograf mit Autoguidingausgang und Remote-Kalibriereingang

- spektrale Auflösung bis zu 18000 λ/Δλ
- optimierter, durchgehender Spektralbereich 395-700nm
- wechselbarer 25µm und 50µm Spalt, je 100µm lang
- kompakt und leicht, nur 1350g (ohne Kamera)
- hohe mechanische Stabilität, FE Design, Verwindungssteifigkeit besser als 9µm bei 180° Schwenk
- optimiert für Sensoren in Größe (~ 15x10mm, 9µm Pixel), z.B. KAF-1603, verwendbar ab 7x4mm, z.B. ST-402
- verwendbar mit DSLR's
- Öffnungsverhältnis des Kollimators f/10
- optimiert für 8"-24" f/10 Teleskope (volle Auflösung von f/8 bis f/12)
- wird voll kalibriert, mit Protokoll ausgeliefert
- Internet-steuerbar mit optionaler RCU-Einheit
- ein Drehmagnet ermöglicht Einkopplung von ThAr Kalibrationslicht und internes Flatfielding, rote LED für Spalt Fokussierung
- Optionale **BACHES**-Version erhältlich mit Glasfasereinkopplung, zur permanenten Installation abseits des Teleskops

www.baader-planetarium.de/news/baches/baches.htm

BACHES RCU

(lieferbar ab 2013)

Präzise und professionelle Kalibrierung der BACHES Echelle-Spektren.

Remote Calibration Unit für BACHES Echelle Spektrograf

- Umschaltbar zwischen voller manueller Kontrolle und Remote-Steuerung
- interne ThAr und Weisslicht-Kontinuumslampen für Spektrenkalibration / Flatfielding
- interne Stromversorgungen für alle Komponenten
- 15mA Hochspannungsversorgung für maximale Effizienz der ThAr Lampe
- vorjustierte Glasfaserkopplung mit abnehmbarer, 2,5m langer 50µm Glasfaser
- 6 polige, 2,5m lange Kabelverbindung zum Baches für motorische Einkopplung und Spaltbeleuchtung
- Glasfaser und Kabel im Lieferumfang der RCU
- Remote Control über 10/100 MBit/s 10base Ethernet (RJ45), TCP/IP Protokoll
- interner Webserver für schnellen und einfachen Internet Zugriff mit jedem Browser
- zusätzlich lokale PC Kontrolle über seriellen RS232 Anschluss möglich
- Breite x Höhe: 215 x 125mm, Tiefe: 320mm (345mm mit Handgriffen)
- Gewicht 5,6 kg, Stromversorgung 230V AC, 25W
- Standardversion mit vier Gummifüßen, optional Schienen für direkte Teleskopmontage erhältlich



Front- und Rückansicht der RCU-Einheit



BAADER PLANETARIUM GMBH

Zur Sternwarte • D-82291 Mammendorf • Tel. +49 (0) 81 45 / 8089-0 • Fax +49 (0) 81 45 / 8089-105
Baader-Planetarium.de • kontakt@baader-planetarium.de • Celestron-Deutschland.de

Vögel, die auf Städte fliegen

Viele Tierarten haben Städte als Lebensraum für sich entdeckt. Die Lebensbedingungen dort sind jedoch anders als in natürlicher Umgebung. **Henrik Brumm, Jesko Partecke** und **Bart Kempenaers** vom **Max-Planck-Institut für Ornithologie** in Seewiesen und Radolfzell erforschen die Folgen des Stadtlebens für unsere heimischen Singvögel. Dabei haben sie erstaunliche Verhaltensänderungen entdeckt.

TEXT **STEFANIE REINBERGER**

Es liegt malerisch, das Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen: eingebettet zwischen Wiesen, Weiden und Wald, am Ufer des Eßsees – dem Weiher, in dem Konrad Lorenz einst mit seinen jungen Graugänsen schwamm. Die gedämpfte Atmosphäre des trüben Novembermorgens verstärkt die Idylle noch. „Natur pur“ könnte denken, wer sich aus dem Trubel der Münchner Innenstadt auf den Weg hier raus gemacht hat. Doch halt: Sind da nicht Verkehrsgeräusche der nahe gelegen Landstraße?

„Ja, klar“, sagt Henrik Brumm, Leiter der Forschungsgruppe Kommunikation und Sozialverhalten. „Und neben den Geräuschen der Autos bekommen wir hier manchmal auch den Lärm des unweit gelegenen Flugplatzes in Oberpfaffenhofen mit.“ Verstädterung ist nicht nur ein Problem der Ballungsgebiete selbst. „Gerade Lärm strahlt weit in die ländlichen Regionen hinein.“ Brumm erzählt von einer Expedition ins Amazonasgebiet: „Selbst inmitten des Regenwalds, fernab jeglicher Zivilisation, habe ich Flugzeuge am Himmel über uns gehört.“

Verstädterung ist ein großes Thema unserer Zeit – für die Vereinten Nationen nach dem Klimawandel das dringlichste überhaupt. Derzeit lebt etwa die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten, mit steigender Tendenz: Prognosen besagen, dass bis zum Jahr 2030 rund fünf Milliarden Menschen in Stadtgebieten siedeln werden. Megacitys entstehen und dehnen sich aus. Das zieht massive Umweltschäden nach sich, Müll etwa oder Luftverschmutzung.

„Auch Lärm ist ein großes Problem“, sagt Brumm und verweist auf eine ganze Reihe von Studien, die belegen, dass Krach krank macht. „Und natürlich nimmt er auch Einfluss auf Wildtiere, egal ob sie nun in Städten leben oder in ländlichen Regionen.“ Der Max-Planck-Forscher interessiert sich genau dafür. Dabei nimmt er insbesondere die Kommunikation von Vögeln unter die Lupe: ob und wie diese durch Lärm beeinträchtigt wird und welche Konsequenzen das für die Tiere hat.

Zu seinem Forschungsfeld kam Brumm bereits während seiner Promotion an der Freien Universität Berlin.

Manche Vogelarten sind erstaunlich erfinderisch, wenn sie sich an die Stadt als Lebensraum anpassen müssen: Hier hat eine Wacholderdrossel ihr Nest in eine Ampelanlage gebaut.



Foto: Avenue Images

Er untersuchte damals den Gesang der Nachtigall, einer Vogelart, die auch in Städten weit verbreitet ist. Allein in Berlin leben rund 1500 Brutpaare, überall dort, wo sich buschiger Bewuchs findet, den sie zum Nisten bevorzugen. Henrik Brumm stellte fest: Nachtigallen singen in einer lärmintensiven Umgebung lauter. Das geht sogar so weit, dass sie am Wochenende leiser trällern als an Werktagen, wenn der Berufsverkehr dröhnt.

Auch wir Menschen heben in lauter Umgebung die Stimme. Man spricht vom Lombard-Effekt, benannt nach dem französischen Ohrenarzt Étienne Lombard, der dieses Phänomen erstmals beschrieb. Bei Vögeln war dieser Zusammenhang allerdings neu. „Das war eine Überraschung, weil man damals davon ausging, dass Vögel immer mit maximaler Lautstärke singen", sagt Brumm. Dass dies nicht der Fall ist, bewies er mit einem einfachen Experiment. Er hielt Nachtigallen in Volieren und beschallte sie mit weißem Rauschen – einer Art Hintergrundgeräusch, das sämtliche hörbaren Frequenzen umfasst und daher nicht als definierter Ton wahrgenommen wird. Und tatsächlich legten sich die Vögel auch unter Laborbedingungen beim Singen mehr ins Zeug, wenn in ihrer Umgebung Krach herrschte.

Später stellten andere Forschergruppen fest: Manche Vogelarten singen in der Stadt auch höher als auf dem Land, Kohlmeisen etwa. Oder Amseln, wie Brumm – mittlerweile längst am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen – in einer Studie zeigte.

HOHE TÖNE GEGEN STRASSENLÄRM?

„Wir haben uns gefragt, warum Vögel nicht nur lauter, sondern auch höher singen", berichtet Brumm. Eine denkbare Erklärung ist, dass sich ein höherer Gesang besser vom tieffrequenten Straßenlärm abhebt. Ist er vielleicht über

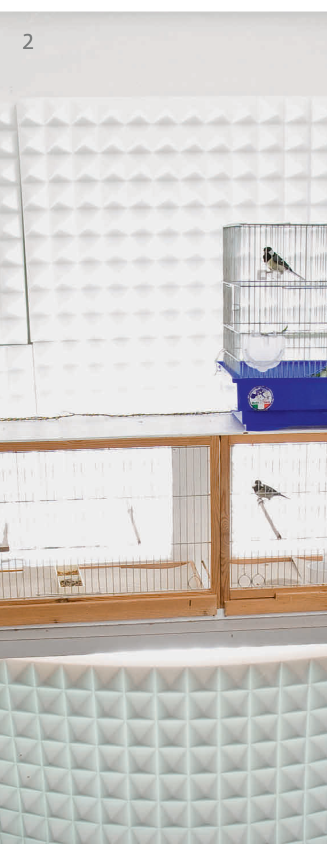
Die Forscher um Henrik Brumm untersuchen in Freilandstudien und Experimenten in Akustiklabors, wie Vögel ihren Gesang an die Umwelt anpassen.

1 | Mathias Ritschard nimmt Vogelgesang in lärmbelasteten Gebieten auf.

2 | Sue Anne Zollinger spielt Jungvögeln in einem schallisolierten Labor Verkehrslärm vor und beobachtet dann ihre Gesangsentwicklung.

3 | Ana Martins, Henrik Brumm und Sue Anne Zollinger (von links) bereiten im Labor akustische Messungen vor.





weitere Strecken zu hören? Und könnte das den Nachteil der Stadtvögel ausgleichen, dass sie lärmbedingt nur über halb so weite Distanzen kommunizieren können wie ihre Artgenossen auf dem Land? Die Forscher aus Brumms Team entwickelten ein mathematisches Modell, um diese möglichen Zusammenhänge zu überprüfen. Das Ergebnis war negativ: Zwar gelingt es durch höheren Gesang tatsächlich, Straßenlärm etwas zu kompensieren, der Effekt ist allerdings gering. „Bei Amseln klappt das gar nicht, da sie viel tiefer singen als etwa Kohlmeisen“, so Brumm.

Das höhere Trällern der Tiere könnte ein reiner Nebeneffekt der gesteigerten Lautstärke sein. Auch das kennt man vom Menschen: Wer schreit, hebt die Stimme in eine höhere Tonlage. Möglicherweise variieren Stadtamseln also ihren Gesang zugunsten der Lautstärke: mehr höhere Passagen, um lauter zu werden. Diese Hypothese prüft Henrik Brumm derzeit in Zusammenarbeit mit seinem Kollegen Jesko Partecke, der am Standort Radolfzell des Max-Planck-Instituts für Ornithologie forscht. Die beiden Wissenschaftler setzen dazu Amseln in schalldichte Boxen, in denen sie nicht durch Umgebungsgeräusche beeinflusst werden, und studieren deren Gesang. Demnach scheinen die Vögel höhere Töne tatsächlich lauter zu produzieren.

KOHLMEISEN LERNEN IM LABOR ZU ZWITSCHERN

Möglich ist aber auch, dass Vögel aus der Stadt Schwierigkeiten haben, die Melodien ihrer Eltern korrekt zu lernen, weil sie diese aufgrund des Lärms schlechter hören. Brumm untersucht das mit seinem Team derzeit im Labor an Kohlmeisen, die im Institut per Hand aufgezogen wurden und dort unter verschiedenen akustischen Bedingungen das Zwitschern lernen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Vögel tiefe Gesangspassagen auch bei Lärm lernen. Lernschwierigkeiten der Jungtiere scheinen also nicht das Problem zu sein.

„Bisher können wir zwar solche Phänomene beobachten, aber wir wissen noch nicht, welche Auswirkung das auf die Tiere hat, auf ihre Lebenserwartung, ihr Brutverhalten oder ihren Paarungserfolg“, sagt Brumm. Seine Mitarbeiterin Sue Anne Zollinger etwa hat jüngst untersucht, ob der lautere Gesang mehr Energie erfordert. Der Effekt war minimal. „Zwar brauchten die Vögel tatsächlich etwas mehr Energie, der Unterschied war jedoch kaum messbar, sodass er die Tiere sehr wahrscheinlich nicht beeinträchtigt“, sagt Brumm.

Verhaltensänderungen in unterschiedlichen Lebensräumen – in diesem Fall Stadt und Land – müssen aber auch nicht zwangsläufig negativ sein

Fotos: Axel Griesch (3)





3



Schnabel auf: In der Stadt singen Amselmännchen lauter, um den Verkehrslärm zu übertönen. Warum sie auch höher singen, ist noch unbekannt. Die zahnartigen Auswüchse im Gaumen (Gaumenpapillen) bestehen aus Horn und dienen dazu, Beutetiere zu packen und in den Schlund zu befördern.

und den Tieren schaden. „Dieselbe Vogelart in der Stadt und auf dem Land zu beobachten bietet die spannende Gelegenheit, Evolution in Echtzeit zu verfolgen", erklärt Jesko Partecke. Denn die notwendigen Voraussetzungen für erfolgreiches Stadtleben setzen sich in den Städten immer mehr durch.

Partecke forscht an Amseln. Dabei waren sie für ihn als jungen Wissenschaftler geradezu banal, wie er lachend verrät. Er war schon auf dem Sprung nach Afrika, um dort für seine Doktorarbeit Schwarzkehlchen zu untersuchen. Doch dann kündigte sich Nachwuchs an, und Afrika schien nicht mehr der geeignete Aufenthaltsort für den werdenden Vater. „Mein Doktorvater bot mir ein Thema mit Amseln im Bereich *Urban Ecology* an", erinnert sich der Ornithologe. Das hat sich als wahrer Glücksgriff erwiesen, denn das Themenfeld war damals noch neu und kaum erforscht. „Amseln sind dafür die idealen Studienobjekte: Sie besiedeln schon seit langer Zeit Städte und kommen dort und auf dem Land gleichermaßen vor. Man kann also gut vergleichen."

STADTAMSELN SIND ANDERS

Es gibt eine Reihe von Verhaltensunterschieden zwischen Stadt- und Landamseln, der Gesang ist nur einer von vielen. So ziehen Stadtamseln im Winter seltener in den Süden als ihre auf dem Land lebenden Artgenossen. Sie brüten etwa drei Wochen früher und manchmal sogar häufiger im Jahr. Und sie leben enger mit Artgenossen zusammen, als es Amseln auf dem Land tun würden.

Manchmal scheint es sogar ein Vorteil für die Tiere zu sein, in der Stadt zu leben: So stellte Partecke im Jahr 2008 fest, dass Stadtamseln seltener unter Parasiten leiden. Zudem sind Stadtvögel stressresistenter. Sind die Tiere ungünstigen Situationen ausgesetzt, reagieren sie ähnlich wie Menschen mit einer akuten Stressantwort und schütten Stresshormone aus, sogenannte Glukokortikoide. Das dient dazu, auf eine gefährliche Situation schnell zu reagieren. Bleiben der Stresspegel und damit auch das Niveau der Stresshormone jedoch über einen längeren Zeitraum hoch – man spricht dann von chronischem Stress –, kann dies Fortpflanzung, Immunabwehr und Gehirnfunktion beeinflussen.

Jesko Partecke wollte nun wissen, ob Stadt- und Landamseln im Umgang mit Stresssituationen unterschiedliche Voraussetzungen mit sich bringen. Dazu sammelten er und seine Mitarbeiter in München und Umgebung Nestlinge und zogen sie von Hand gemeinsam auf. Alle jungen Vögel hatten also dieselben Startbedingungen – zumindest, was ihre Umgebung betrifft. Dann setzten sie die Tiere akutem Stress aus

Foto: MPI für Ornithologie

1 Stadtamseln können besser mit Stress umgehen als Amseln vom Land. Für diese Untersuchungen hat Jesko Partecke Nestlinge von Stadt- und Waldamseln von Hand aufgezogen und ihre Hormonwerte in Stresssituationen gemessen.

2 Mithilfe neuester Radiotelemetrie-Technik können die Wissenschaftler einen Vogel orten und sein Aktivitätsmuster kontinuierlich aufzeichnen. Kleine Datenspeicher, die mit Lichtsensoren ausgestattet sind, quantifizieren zudem die Lichtstärke, der das Tier in der Nacht ausgesetzt ist.

3 Davide Dominoni ortet Stadtamseln in München.







und nahmen Blutproben. Tatsächlich blieben die jungen Stadtamseln deutlich cooler als ihre Artgenossen vom Land und reagierten weniger auf Stresssituationen. In stressfreier Umgebung war der Hormonpegel dagegen in beiden Vogelgruppen ähnlich.

UNTER DER LATERNE

Mit einer anderen Art von Umweltveränderung in Städten beschäftigt sich Bart Kempenaers, Direktor der Abteilung Verhaltensökologie und evolutionäre Genetik in Seewiesen: dem allgegenwärtigen Kunstlicht auf Straßen und Plätzen. Er hat festgestellt, dass männliche Blaumeisen sich erfolgreicher paaren, wenn sie in der Nähe von Straßenlaternen leben. „Dass wir darauf gekommen sind, war eigentlich Zufall", verrät der aus Belgien stammende Verhaltensforscher (MaxPlanckForschung 1/2004, Seite 64 ff.). Er untersuchte vor ein paar Jahren in einer großen Feldstudie das Brutverhalten von Blaumeisen.

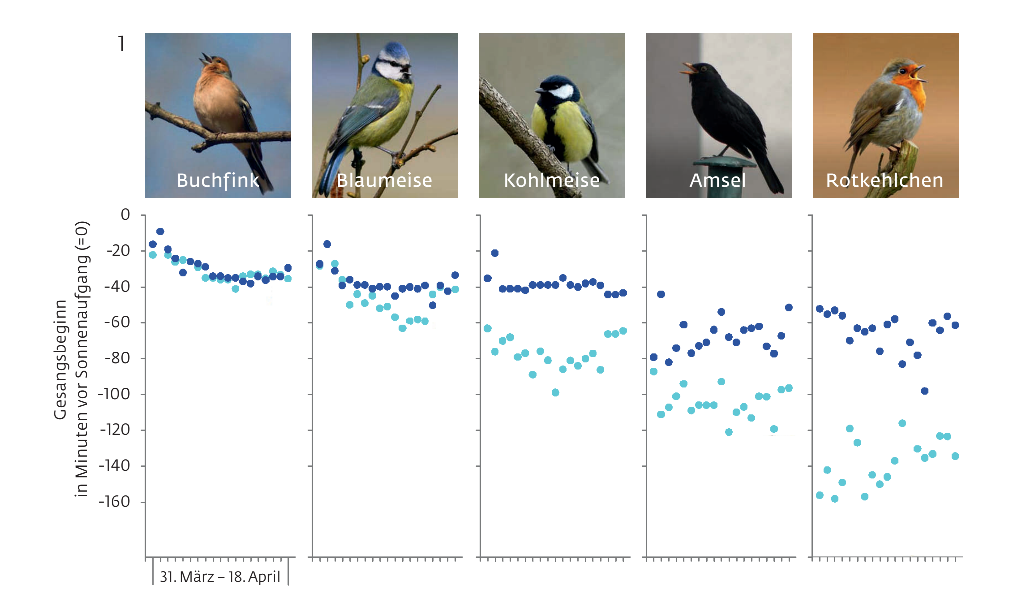
„Die Tiere zeigen dabei eine große Variationsbreite: Sie leben zum Teil monogam, zum Teil mit mehreren Partnern, wieder andere haben zwar einen festen Partner, sie gehen aber darüber hinaus auch noch fremd", erzählt Bart Kempenaers. In der Studie ging es unter anderem auch darum, durch Vaterschaftstests aus DNA-Proben herauszufinden, welche Männchen erfolgreich fremdgehen und die meisten Nachkommen zeugen. Das überraschende Resultat: Am erfolgreichsten waren Tiere in der Nähe von Straßenlaternen. >

Fotos: MPI für Ornithologie (3)

1 Gesang vor Sonnenaufgang: In der Nähe von Straßenlampen (hellblaue Kreise) beginnen manche Vogelarten früher zu singen als ohne künstliche Beleuchtung (dunkelblau). Der Unterschied ist bei den Arten ausgeprägter, die von Natur aus früh singen, etwa Amsel und Rotkehlchen. Beim Buchfink dagegen hat künstliches Licht keinerlei Einfluss auf den Start des Gesangs. Für die Untersuchung wurden Vögel in einem Waldgebiet in der Nähe von Wien mit unterschiedlicher Beleuchtung 19 Tage lang beobachtet.

2 Ein Industriegebiet nahe Geel in Belgien. Bei Nacht ziehende Vogelarten werden häufig von solchen hell erleuchteten Flächen angezogen und verlieren dadurch ihre Orientierung. Viele Tiere sterben durch Kollisionen mit den Lichtquellen. Andere Auswirkungen auf die Vögel sind noch kaum untersucht und könnten beispielsweise von der Lichtfarbe abhängen.

3 Mitternachtssonne: Niels Rattenborg, Mihai Valcu und Bart Kempenaers (von links) erforschen das Verhalten von Graubruststrandläufern bei Barrow in Alaska. Wenn sich diese Vogelart fortpflanzt, herrscht Tageslicht rund um die Uhr. Die Tiere haben sich an die besonderen Lichtverhältnisse in der arktischen Tundra angepasst: Die aktivsten Männchen kommen in dieser Zeit mit sehr wenig Schlaf aus und zeugen die meisten Nachkommen.





„Möglicherweise hängt das damit zusammen, dass sie durch das künstliche Licht morgens früher zu zwitschern beginnen und dadurch die Aufmerksamkeit der Weibchen auf sich ziehen“, erklärt Kempenaers. Der frühe Vogel fängt also die Frau. Tatsächlich beginnen männliche Blaumeisen dank des künstlichen Lichts etwa fünfzehn bis zwanzig Minuten früher zu singen. Bei Amseln ist der Effekt sogar noch größer. Außerdem beginnen Vogelweibchen unter Kunstlicht einige Tage früher mit dem Eierlegen. Licht wirkt sich also nicht nur auf den Tagesablauf aus, sondern auch auf saisonale Abläufe wie den Beginn der Fortpflanzung.

Welche Auswirkung die Lichtverschmutzung sonst auf die Tiere hat, ob sie etwa ihren Stoffwechsel oder die Lebenserwartung beeinträchtigt, ist noch völlig unklar. „Als ich vor zwei Jahren begann, mich mit dem Thema Lichtverschmutzung zu beschäftigen, war ich überrascht, wie wenig man darüber weiß“, sagt Bart Kempenaers. Er ist allerdings überzeugt, dass der veränderte Tag-Nacht-Rhythmus nicht zwangsläufig negative Konsequenzen nach sich zieht.

SCHLAFLOS IN ALASKA

In Alaska untersucht der Max-Planck-Forscher etwa Vogelarten, die während der Sommermonate unter andauernder Helligkeit leben. Manche lassen sich davon weniger beeindrucken und leben einfach ihren Rhythmus weiter, scheinen sich also an anderen Zeitgebern zu orientieren. Und andere, etwa der Graubruststrandläufer, finden tagelang überhaupt keine Ruhe mehr – und paaren sich ausgerechnet in diesen Phasen höchst erfolgreich.

„Das kann man natürlich nicht auf unsere Blaumeisen übertragen, da sich die Tiere in Alaska über einen langen

Grafik: 2010 Current Biology 20: 1735-1739, Elsevier Ltd.





3

Foto: Jan Kempenaers (links), Peter Mombaerts (rechts)

Zeitraum an diese extremen Lichtbedingungen angepasst haben", betont Kempenaers. Aber es zeigt, wie wenig wir über den Lebensrhythmus unserer heimischen Vogelarten wissen. Kempenaers will dem Thema künftig in einer großen Studie gemeinsam mit niederländischen Kollegen nachgehen. Dazu beobachten die Forscher Vögel in einem Waldgebiet, in dem nach dem Zufallsprinzip verschiedene künstliche Lichtquellen installiert wurden.

Auch Jesko Partecke interessiert sich für den Einfluss des Kunstlichts auf Vögel, weshalb er und seine Mitarbeiter Amseln mit Sendern und Lichtsensoren ausstatteten. So können sie nicht nur den Aufenthaltsort und die Aktivität der Tiere erfassen, sondern auch, wie viel Licht sie tatsächlich ausgesetzt sind und zu welchen Zeiten. „Damit sind wir erstmals in der Lage, die direkte Auswirkung der Lichtverschmutzung zu messen", sagt Partecke. Derzeit werten die Forscher aus seinem Team die Daten des Experiments aus. Bald können sie also hoffentlich mehr darüber sagen, welche Rolle das Kunstlicht spielt.

Aber sind die Verhaltensunterschiede zwischen Stadt- und Landtieren tatsächlich bereits Folgen einer Mikroevolution, also einer direkten Anpassung an eine neue Umgebung und den herrschenden Selektionsdruck? Jesko Partecke hat da noch eine andere Idee: „Ich glaube, es ist ähnlich wie bei uns Menschen: Manche Individuen würden in der Hektik der Stadt krank werden und ziehen deshalb das ruhige Landleben vor, während andere genau die Hektik brauchen." Demnach gibt es also auch bei Vögeln unterschiedliche Charaktertypen, die unterschiedliche Voraussetzungen mit sich bringen. Und so zieht es vielleicht manche in die Großstadt, während andere Landeier bleiben. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Vögel passen sich an die unterschiedlichen Lebensbedingungen von Stadt und Land an. Dabei lässt sich Evolution in Echtzeit verfolgen.**
- **Die Lärm- und Lichtverhältnisse in Städten beeinflussen Verhalten und Physiologie der Tiere. So etwa singen Nachtigallen und Amseln in Städten lauter und höher als auf dem Land; Straßenlaternen wiederum beeinflussen den Fortpflanzungserfolg von Blaumeisen.**


HSBC
SAMSUNG
Coca-Cola



Foto: Corbis

Spiritualität 2.0

Yoga, Tai Chi und Qi Gong sind auch nicht mehr das, was sie einmal waren. So viel steht für den Anthropologen **Peter van der Veer** fest. Am **Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften** in Göttingen hat er die Bedeutung des Spirituellen und seiner Wandlungsprozesse in modernen Gesellschaften untersucht.

TEXT **BIRGIT FENZEL**

Spätestens als sich zur Sommersonnenwende mehrere Tausend Menschen gemeinsam auf dem Times Square zum Sonnengruß streckten, wurde allgemein sinnfällig, wie sehr Yoga zu einer westlichen Massenbewegung geworden ist. Ob solche Veranstaltungen tatsächlich noch etwas mit den ursprünglichen Vorstellungen von Spiritualität zu tun haben, das wagt Peter van der Veer jedoch zu bezweifeln. „Es fehlen die kritischen Elemente, wie sie noch in den spirituellen Ideen zu Beginn des 20. Jahrhunderts steckten“, erklärt der Anthropologe.

Für den Direktor am Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften gehört die Spiritualität im Kanon mit all den anderen säkularen Ideen von Nationen, Gleichheit, Bürgertum, Demokratie und Rechten, wie sie im Gefolge der Aufklärung entstanden sind, zu den zentralen Elementen in der Geschichte der Modernität, die sich gegen die althergebrachten Gesellschaftsordnungen und Wertvorstellungen richteten. „Das Spirituelle und das Säkulare sind im 19. Jahrhundert gleichzeitig als zwei miteinander verbundene Alternativen zur institutionalisierten Religion in der euroamerikanischen Moderne entstanden“, lautet eine der Kernthesen van der Veers.

GEISTIGE WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN OST UND WEST

Damit verweist der Wissenschaftler ganz nebenbei auch die verbreitete Ansicht, dass die Wiege der Spiritualität in Indien liege, ins Reich der modernen Mythen. Auch von Hinduismus, Taoismus oder Konfuzianismus sei in Asien vor der Begegnung mit dem westlichen Imperialismus nicht die Rede gewesen. „Es gab zwar die Traditionen, aber ohne das Suffix“, sagt van der Veer. Zu einem „-ismus“ hätten sich Traditionen erst durch die intellektuelle Wechselwirkung mit dem Westen gewandelt.

Dieser rege geistige Austausch zwischen Ost und West ist nach Überzeugung des Göttinger Max-Planck-Forschers ein wesentliches Element in der

Sonnenkult auf dem Times Square: Tausende moderner Yogis feiern den längsten Tag des Jahres 2010.





Die Göttin Kali (links) symbolisiert in der hinduistischen Mythologie Zerstörung und Erneuerung. Swami Vivekananda (rechts) ließ sich von ihr im Tempel seines Meisters Ramakrishna inspirieren. Er erneuerte dessen philosophische Ideen und Praktiken und transportierte sie nach Amerika.

Entwicklung der Modernität im Allgemeinen sowie ihrer Spiritualität im Besonderen: „Für mich ist sie Teil eines Prozesses, den ich als interaktionale Geschichte bezeichne."

DER BLICK RICHTET SICH NACH INDIEN UND CHINA

Van der Veers Vorschlag lautet, einmal nicht den Universalismus der Aufklärung in den Mittelpunkt einer Studie über Spiritualität zu rücken, sondern die Universalisierung von Ideen, die sich im Verlauf einer Geschichte von Interaktionen herausgebildet haben. Das rationale Konzept der Aufklärung und der Fortschritt seien nicht allein in Europa aufgekommen und andernorts auf der Welt einfach so übernommen worden. Vielmehr entstanden und verbreiteten sie sich mit der Ausweitung der europäischen Macht.

„Wenn ich in meiner Studie Indien und China in den Mittelpunkt rücke, dann nicht nur, weil die Universalisierungsgeschichte dieser Gesellschaften sehr unterschiedlich und damit besonders spannend ist, sondern auch, weil sich damit im Rückschluss wichtige Erkenntnisse über die Entwicklung der Spiritualität in Europa und den USA bieten", erklärt der Forscher seinen Ansatz. Tatsächlich beschränkte sich der Austausch der neuen revolutionären Ideen keineswegs auf die Kommunikation zwischen den USA und Europa.

Auf der Suche nach Alternativen zu den institutionalisierten Religionen hatte sich der Blick westlicher Intellektueller, Künstler oder anderer gesellschaftlicher Vordenker schon früh auf die Traditionen des Ostens gerichtet. Die Liste derer, die sich in ihren Werken oder Briefen auf indische Vorbilder bezogen, liest sich wie ein *Who's who* der europäischen Geisteswelt: Voltaire, Herder, Humboldt, Schlegel, Novalis bis hin zu Schopenhauer oder Goethe, der unter anderem spezielle Theatertechniken aus der altindischen Literatur in seinen *Faust* einbaute.

Von Indien als Ort der Spiritualität, des Mystizismus und der Wiege alter philosophischer Traditionen kursierten Vorstellungen, mit denen sich die Sinnlücken füllen ließen, die sich seit der Aufklärung für viele aufgetan hatten. „Diese Vorstellungen wiederum stießen auch in Indien selbst auf fruchtbaren Boden", so der Göttinger Anthropologe über die wechselseitige Dynamik der Gedankenströme. Vor allem religiöse Bewegungen in Indien machten sich den westlichen Diskurs über fernöstliche Spiritualität zu eigen.

Bald mischten sich auch politische Untertöne in die Diskussionen. „Manche betonten, dass Hindus die wahren Inder seien, deren Zivilisation durch die muslimische Herrschaft vom Untergang bedroht sei", beschreibt Peter van der Veer das aufkeimende Nationalgefühl, das sich in die Debatte mischte. Andere sahen den Westen und insbesondere die britische Kolonialmacht als Gefahren für die hinduistische Kultur und Zivilisation und setzten auf die Spiritualität zur Rückgewinnung oder Wahrung der eigenen Identität.

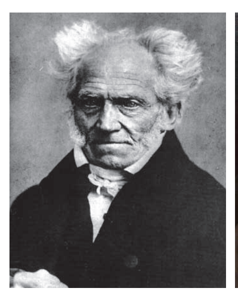
„Der Werdegang von Swami Vivekananda zu einem der wichtigsten indischen Reformer des 19. Jahrhunderts ist beispielhaft für diese Vorgänge", so der Forscher, der Vivekananda als den „wahrscheinlich ersten großen indischen Advokaten einer Hindu-Spiritualität" bezeichnet.

Im Jahr 1863 als Sohn eines Rechtsanwalts in Kalkutta geboren, hatte Vivekanada die seinerzeit übliche exquisite westlich geprägte Bildung eines Sprösslings der oberen Gesellschaftsschicht seiner Geburtsstadt genossen. So lernte er während seiner Schulzeit bereits die Ideen westlicher Philosophen und Intellektueller kennen, wobei die gesellschaftlichen Theorien des Engländers Herbert Spencer, der als Erster die Evolutionstheorie auf die Gesellschaft an-

Europäische Geistesgrößen, die indisches Gedankengut in ihre Werke einbrachten: Johann Gottfried Herder, Alexander von Humboldt, Arthur Schopenhauer und Johann Wolfgang von Goethe.









Fotos: dpa – picture alliance (oben links), OH (oben rechts und unten)

> » Die Liste derer, die sich in ihren Werken oder Briefen auf indische Vorbilder bezogen, liest sich wie ein *Who's who* der europäischen Geisteswelt.

gewendet hatte, sicher ihren Anteil an seiner späteren Kritik an der westlichen Zivilisation besaßen.

Die spirituelle Initialzündung in Vivekanandas Leben erfolgte durch seinen Kontakt mit dem Mystiker Ramakrishna, der als einfacher Priester in einem Tempel der Göttin Kali eine ekstatische Form tantrischen Yogas praktizierte und lehrte. Nach anfänglichem Sträuben wurde Vivekananda zu seinem Lieblingsschüler. Später entwickelte er eine moderne, überarbeitete Version der religiösen Ideen und Praktiken seines Meisters Ramakrishna, wobei er dessen Ideen und Praktiken in einen neuen Hindu-Spiritualismus transformierte.

FRÜHE WERBUNG FÜR GEISTIGE TOLERANZ

Als von allem vermeintlich Verstörenden bereinigte Lightversion war dieser sowohl für die eher westlich orientierten Vertreter der indischen Mittelklasse als auch für das westliche Publikum in Übersee leichter zugänglich als die ursprüngliche Version seines Gurus mit der Göttin Kali im Zentrum, die mit herausgestreckter Zunge und einer Kette von Totenschädeln um den Hals auf dem Körper der Göttin Shiva tanzt. Als wesentlicher Charakterzug von Vivekanandas Vorstellung gilt ihre Offenheit. So etwa lässt sie sämtliche klassische Heilswege des Hinduismus nebeneinander existieren und wirbt auch allgemein für geistige Toleranz.

Regelrechten Popstarstatus in der westlichen Welt erreichte Swami Vivekananda durch einen Auftritt auf dem Weltkongress der Religionen in Chicago von 1893, an dem er im Rahmen einer Lesereise teilnahm. In seiner Rede proklamierte er seinen Stolz darauf, einer Religion anzugehören, die die Welt gleichermaßen Toleranz und universelle Akzeptanz lehrt. In seinen Vorträgen verglich er seine Heimat als Wiege der Spiritualität und religiösen Hingabe mit der Zivilisation des Westens, die bei allem technischen Fortschritt dem Materialismus verfallen sei. >



Yoga im Büro: Gelingt hier die Vereinigung von Spiritualität und Materialität? Oder verkehrt eine Bewegung, die sich ursprünglich gegen den Kapitalismus richtete, ihren Zweck ins Gegenteil?

Collage: designergold nach Vorlagen von dpa – picture alliance und MPG





Annäherung der Kulturen: Den Stadtteil Pudong im Blick, beginnen Frauen in Shanghai ihren Tag ganz traditionell mit einer Runde Tai Chi (oben). In New York (unten) lassen sich Tausende Yogaanhänger selbst durch große Hitze nicht davon abhalten, auf dem Times Square zu praktizieren.

„Dieser Auftritt und die anschließende Lesereise durch die USA sind mit hoher Wahrscheinlichkeit der Anfang der ersten Hindu-Missionsbewegung“, sagt Peter van der Veer über die Wirkung von Vivekanandas Worten. Für den Forscher steht außer Zweifel, dass Vivekanandas Konzept des Spiritualismus großen Einfluss auf Hindu-Nationalismus in allen Varianten und ebenso auf das globale Verständnis von Spiritualität hatte. So finde es sich auch in den Vorstellungen von zwei weiteren namhaften Protagonisten der indischen Geschichte wieder: bei Mohandas Gandhi und dem bengalischen Dichter und Literaturnobelpreisträger Rabindranath Tagore.

Tagore war davon überzeugt, dass eine einzigartige Spiritualität Asien eint. Von dieser Idee versuchte er auf verschiedenen Lesereisen in China und Japan auch die dortigen Intellektuellen für eine panasiatische Bewegung zu gewinnen – mit dem Ziel, eine gemeinsame Zivilisation in Asien zu errichten.

Allerdings habe sich der Literaturnobelpreisträger laut van der Veer gegenüber jeder Form von überhöhtem Nationalismus höchst kritisch, wenn nicht sogar feindselig gezeigt: „Dass ausgerechnet seine Gedichte heutzutage in Indien und Bangladesch in den Nationalhymnen verwendet werden, erscheint als Ironie der Geschichte.“

Gandhi habe dagegen einen Weg gefunden, die Vorstellungen von universaler Spiritualität an nationalistische Projekte zu knüpfen. „Er tat dies, indem er sagte, dass niemand, der in eine bestimmte Tradition und Zivilisation geboren wurde, missionieren oder konvertieren sollte“, so der Forscher. Vielmehr solle jeder Mensch die Wahrheit in seinen eigenen Traditionen suchen. In diesem Sinne konnte Gandhi für eine spirituelle Nation argumentieren, die internationale religiöse Unterschiede überwindet.

MOHANDAS GANDHI VERSÖHNT WIDERSPRÜCHLICHE KONZEPTE

„Angesichts der Tatsache, dass die Spannungen zwischen Muslimen und Hindus zu den größten Problemen des indischen Subkontinents gehören, war die Vorstellung einer solchen universalen, allumfassenden Spiritualität von außerordentlicher politischer Bedeutung“, sagt van der Veer. Für ihn als Forscher erscheint Gandhis Interpretation von Spiritualität auch in anderer Hinsicht sehr interessant, denn ihre Grundeigenschaften gelten stellvertretend für die Gesamtidee: „Die Tatsache, dass sie als universell betrachtet werden kann und dabei zugleich an Konzepte nationaler Identität gebunden erscheint, ist ein zentraler Widerspruch im Konzept von Spiritualität.“

Der Wissenschaftler sieht Gandhi als gutes Beispiel dafür, dass Spiritualität keineswegs das Gegenteil von Säkularität ist. „Seine Spiritualität war mit der Säkularität zutiefst verbunden, wenn er argumentierte, dass alle Religionen gleich behandelt werden sollten und der Staat sich neutral zu ihnen verhalten sollte.“

Diese besondere Spiritualität sieht Peter van der Veer auch in den politischen Ideen von Jawaharlal Nehru, dem ersten Ministerpräsidenten Indiens; Nehru arbeitete für ein säkulares und demokratisches Indien. Diese Spi-

Fotos: Fnoxx (oben), Corbis (unten)

ritualität steht für den Forscher auch hinter der Idee der Nicht-Paktgebundenheit, wie sie Nehru 1954 der Welt erstmals präsentierte und die ihn zu einem Anführer der blockfreien Staaten als Alternative zu Kapitalismus und Kommunismus werden ließ: „Diese spirituellen Prinzipien gelten nach wie vor in Indien und zeigen Kontinuität zwischen der kolonialen und postkolonialen Situation. Man könnte sie als indischen Säkularismus bezeichnen."

Für van der Veer schließen sich Spiritualität und Materialität keineswegs aus – vielmehr bedingen sie einander häufig, wie er anhand der Entwicklungen in China und Indien beobachtet. Erst durch die Liberalisierung der Wirtschaft unter dem Einfluss des globalen Kapitalismus seien in China als einem Land, welches den Konfuzianismus durch einen aggressiven Säkularismus ersetzte, der die Religionen, Tempel und Priester massiv attackierte, traditionelle spirituelle Vorstellungen und Praktiken wie Tai Chi, Feng Shui oder Qi Gong wieder gesellschaftsfähig geworden.

Auch in Indien hat er diese Verbindung von Spiritualität und Materialität im Gefolge der ökonomischen Globalisierung beobachtet. In diesem Fall sei der Impuls vor allem von den hochgebildeten Mitgliedern der indischen Mittelklasse gekommen, die in den 1970er- und 1980er-Jahren in die USA gegangen waren, um dort Jobs in medizinischen oder technischen Berufen zu finden.

„Dort wurden sie mit der aggressiven Vermarktung indischer Spiritualität konfrontiert, die auf einem Markt für Gesundheit, Sport oder Managementtraining angeboten wurde", erklärt van der Veer. Es habe nicht lange gedauert und diese Praxis sei auch nach Indien importiert worden. Zum einen habe sie als Rückbesinnung auf die alten, identitätsstiftenden Werte sehr gut zu dem sich gerade ausbreitenden Hindu-Nationalismus gepasst, der die früheren säkularen und multikulturellen Bestrebungen des indischen Staates ablehnte. Insbesondere die neumodische urbane Form der Religiosität interessiere sich dabei gleichermaßen für Yoga und für Nationalismus.

Zum anderen eigne sich diese urbane Religiosität auch dazu, die Bedürfnisse einer neu erstarkenden Mittelklasse zu befriedigen – ein Phänomen, das mittlerweile auch in China festzustellen sei. Dabei hätten die modernen Versionen der Spiritualitäten allerdings nur eine dünne Verbindung mit den alten, überlieferten Traditionen. Doch seien sie äußerst kreativ in der Reaktion auf neue Gelegenheiten und Ängste, die durch die Globalisierung entstanden sind.

EINE BEWEGUNG FÜHRT SICH AD ABSURDUM

Im Zuge der wirtschaftlichen Globalisierung gingen Spiritualität und Materialität für so manchen eine in jeder Hinsicht bereichernde Verbindung ein. Für den vielleicht interessantesten Teil der Liaison mit dem neoliberalen Kapitalismus hält der Göttinger Forscher die globalen Businesspraktiken, bei denen die Spiritualität Mittel zum Zweck der Erfolgssteigerung wird. Zwar verzögerte sich durch Chinas Isolation zwischen 1950 und 1980 die Einführung der chinesischen Spiritualität auf dem Weltmarkt, doch sei mit Tai Chi, Qi Gong und Feng Shui der weltweite Massenerfolg von Yoga inzwischen schon fast aufgeholt.

Offenbar passen Meditationstechniken und spirituelle Erfahrungen hervorragend zum Lebensstil und Zeitgeist moderner Arbeitnehmer auf dem Weg der Selbstoptimierung für Markt und Wirtschaft. Außerdem präsentieren experimentelle Stile spirituellen Lebens eine Alternative zu dem vielen als leer erscheinenden säkularen und religiösen Leben.

„Von außen betrachtet, erlauben sie Menschen innerhalb disziplinierender Institutionen, ohne ein Übermaß an Stress oder Depressionen ihre Ziele in Karriere und Leben zu verfolgen", meint der Max-Planck-Wissenschaftler Peter van der Veer. Anstatt sich den Herausforderungen des eigenen Lebens zu stellen, richtet man sich mit der wie auch immer produzierten spirituellen Erfahrung gemütlich ein.

Wenn Yoga, Tai Chi oder Qi Gong jedoch als Produkte der Wellnessindustrie einer Körperkultur zur Steigerung der Effizienz von disziplinierten, wohltemperierten Arbeitnehmern in einer kapitalistischen Gesellschaft dienen, führt sich die Bewegung, die sich in ihren Anfängen gegen das Establishment oder gegen den Kolonialismus oder Kapitalismus richtete, ad absurdum. ◂

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Spiritualität hat als universales Konzept eine Weltkarriere hinter sich und gehört zu den zentralen Elementen in der Geschichte der Modernität. Ihre Ursprünge liegen – entgegen landläufiger Meinung – nicht etwa in Indien, sondern in der euroamerikanischen Moderne des 19. Jahrhunderts.**
- **Heute beobachten Forscher eine Verbindung von Spiritualität und Materialität. So sind etwa in China unter dem Einfluss des globalen Kapitalismus wieder traditionelle spirituelle Vorstellungen und Praktiken wie Tai Chi, Feng Shui oder Qi Gong gesellschaftsfähig geworden.**
- **Meditationstechniken und spirituelle Erfahrungen passen offenbar hervorragend zum Lebensstil und Zeitgeist moderner Arbeitnehmer auf dem Weg der Selbstoptimierung für Markt und Wirtschaft. Somit erfährt die Spiritualität einen Bedeutungswandel.**

GLOSSAR

Konfuzianismus: Oberbegriff für Philosophien und politische Vorstellungen, die sich in die Tradition des Konfuzius (vermutlich 551 bis 479 vor Christus) und seiner Schüler stellen. Der Konfuzianismus – die Bezeichnung geht auf christliche Missionare im 17. Jahrhundert zurück – prägt seit vielen Jahrhunderten die chinesische Kultur und Gesellschaft.

Säkularität: Eine aus der Trennung von Religion und Staat resultierende gesellschaftliche Ideologie, die sich auf die Erfahrungswelt richtet und Transzendentes ausklammert.

Spiritualität: Sehr weit gefasster Begriff, der sich auf geistige oder transzendente Vorstellungen oder Erfahrungen aller Art bezieht, die nicht unbedingt nur religiöser Natur sein müssen.

Zellen lassen die Muskeln spielen

Wenn das Herz schlägt oder der Körper mit einem Schnupfen kämpft, kommt stets ein Molekül zum Einsatz, das die nötige Energie für diese Prozesse liefert: das Adenosintriphosphat. Dessen zentrale Bedeutung für den Stoffwechsel erkannten vor rund 80 Jahren die beiden Biochemiker **Karl Lohmann** und **Otto Fritz Meyerhof** am **Kaiser-Wilhelm-Institut für medizinische Forschung** in Heidelberg.

TEXT **MAREN EMMERICH**

Berlin im Dezember 1928: In der physiologischen Abteilung des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Biologie blickt Karl Lohmann gebannt auf die Salzsäure, die in dem Kolben vor ihm brodelt. Darin schwimmt eine ganz besondere Substanz. Lohmann hat sie soeben aus frischen Kaninchenmuskeln isoliert. Seit sieben Minuten kocht sie nun in der 100 Grad heißen Flüssigkeit vor sich hin.

Jetzt gibt der Chemiker Molybdänlösung hinzu – und der Inhalt des Kolbens färbt sich blau. Der Stoff aus dem Muskel hat also Phosphat freigesetzt. Als weitere Zerfallsprodukte kann Lohmann Adenin und Pentosephosphorsäure nachweisen. Und es gelingt ihm auch, die Mengenverhältnisse der einzelnen Bestandteile zu bestimmen. Er nennt sein Produkt „Adenylpyrophosphorsäure" und veröffentlicht seine Erkenntnis unter dem nüchternen Titel „Über die Pyrophosphatfraktion im Muskel" am 2. August 1929 in der Zeitschrift NATURWISSENSCHAFTEN.

Heute dürfte dieser Artikel zu den meistzitierten Arbeiten innerhalb der gesamten Biologie zählen: Er markiert die Entdeckung des universellen Energieträgers der Zelle – Adenosintriphosphat, kurz ATP. Er besteht aus je einem Molekül der Base Adenin und des Zuckers Ribose, an den drei Phosphatgruppen angehängt sind.

Im Sommer 1929 stellte Karl Lohmann das ATP auf dem Internationalen Physiologenkongress in Boston vor. Aber weder der Vortrag noch die Veröffentlichung stießen bei den Kollegen auf großes Interesse. Weitere Versuche waren nötig, um herauszufinden, welche Rolle das Adenosintriphosphat im Körper spielt. Mit dieser Frage setzten sich Lohmann und sein Chef, der Physiologe und Nobelpreisträger Otto Fritz Meyerhof, in den kommenden Jahren intensiv auseinander.

Meyerhof entstammte einem wohlhabenden deutsch-jüdischen Elternhaus. Er wurde 1884 in Hannover geboren, verbrachte aber den größten Teil seiner Kindheit und Jugend in Berlin. Hier machte er 1903 Abitur und nahm anschließend ein Medizinstudium auf. Seine wissenschaftlichen Interessen galten zunächst der Psychiatrie und der Philosophie. Im Jahr 1909 promovierte er bei Franz Nissl in Heidelberg über die „psychologische Theorie der Geistesstörung".

Als Assistent an der Heidelberger Medizinischen Klinik arbeitete er mit Otto Warburg zusammen, der später für seine Erkenntnisse zur Entwicklung von Krebszellen berühmt wurde und 1930 Gründungsdirektor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Zellphysiologie in Berlin war. In der Zusammenarbeit entflammte Meyerhofs Interesse für den Energiestoffwechsel von Muskelzellen, der nach seinem Wechsel an die Universität Kiel das Zentrum seiner Forschung war.

Wenn Muskeln unter anaeroben Bedingungen arbeiten – also in Abwesenheit von Sauerstoff –, entsteht Milchsäure, die drei Kohlenstoffatome enthält. Sobald man dem Gemisch Sauerstoff zuführt, verschwindet die Milchsäure wieder. Bei dieser Reaktion wird stets genau so viel Sauerstoff verbraucht, wie nötig ist, um ein Viertel bis zu einem Sechstel der Milchsäure zu oxidieren – den Rest verwandelt die Zelle zurück in die Speichersubstanz Glykogen.

Diesen festen Quotienten zwischen der Gesamtmenge der verbrauchten Milchsäure und dem oxidierten Anteil hat Otto Meyerhof aufgespürt. Dem Wissenschaftler brachte diese Entdeckung 1922 den Medizin-Nobelpreis ein, und der Quotient trägt heute noch seinen Namen. Als Reaktion auf den Preis erhielt Meyerhof, damals noch Assistent von Rudolf Höber in Kiel, die Möglichkeit, als Professor in die USA zu gehen. Meyerhof zog jedoch ein Angebot der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft vor und übernahm 1924 die Leitung der Abteilung für Physiologie am Kaiser-Wilhelm-Institut für Biologie in Berlin. Bald darauf stellte er den frisch promovierten Chemiker Karl Lohmann ein.

Lohmann kam 1898 in Bielefeld als fünftes Kind einer Landwirtsfamilie zur Welt. Nach dem Ersten Weltkrieg begann er 1919 in Münster mit dem Chemiestudium und wechselte drei Jahre spä-

Im Jahr 1930 besuchte Sir Archibald Hill (sitzend rechts), der sich 1922 mit Otto Meyerhof (sitzend links) den Medizin-Nobelpreis geteilt hatte, Meyerhofs Arbeitsgruppe in Heidelberg. Hinter den beiden Laureaten steht ganz links Karl Lohmann, der Entdecker des ATPs.

Foto: Archiv der Max-Planck-Gesellschaft

ATP – das Molekül, das die Energetik des Lebens in drei Buchstaben zusammenfasst, besteht aus Adenin, Ribose und drei Phosphatgruppen. Beim Abspalten einer Phosphatgruppe entsteht Energie, welche die Zelle vielfältig nutzt.

ter nach Göttingen. Hier promovierte er 1923 mit einer Arbeit über Montanharze. Schon während des Studiums hatte er sich für physiologische Fragestellungen begeistert, denen er sich nach der Promotion zuwandte. Bevor sich Lohmann Meyerhofs Arbeitskreis anschloss, hatte er als Praktikant im Göttinger Pharmakologischen Institut zwei Arbeiten über den Zustand des Cholesterins im Blutserum sowie eine Methode zur Serum-Cholesterinbestimmung veröffentlicht.

Karl Lohmanns praktisches Geschick erwies sich als hervorragende Ergänzung zu der eher theoretischen Begabung Meyerhofs, der sich nebenbei weiterhin seinen philosophischen Interessen widmete und jahrelang Mitherausgeber der Reihe Abhandlungen der Friesschen Schule war.

Die beiden Wissenschaftler erkannten, dass die Abspaltung eines Phosphatrests aus dem ATP-Molekül den Muskelschlag ermöglicht. Bei dieser Reaktion entsteht ziemlich genau dieselbe Menge

Der Tagesspiegel vom 11. April 1998



Es ist sicher nicht übertrieben, das ATP neben die DNA, das Molekül, das unsere Erbinformation trägt, zu stellen. Das eine [Molekül] faßt die Energetik des Lebens, das andere seine Genetik in drei Buchstaben zusammen – drei Buchstaben, hinter denen sich außer komplizierter Chemie nicht weniger als Bausteine unseres auf Physik und Chemie reduzierten mechanistischen Weltbildes verbergen.«

an freier Energie wie auch beim Kreatinphosphat, wenn dieses eine Phosphatgruppe entlässt; hiervon enthalten Muskeln etwa fünfmal mehr als ATP. Meyerhof und Lohmann schlossen aus diesen Beobachtungen, dass Kreatinphosphat als mittelfristiger Energiespeicher im Muskel wirkt. Denn wenn das ATP bei der Muskelkontraktion eine Phosphatgruppe abspaltet, kann das Kreatinphosphat diesen Verlust ausgleichen, indem es seinerseits eine Phosphatgruppe auf das Adenosindiphosphat (ADP) überträgt und daraus wieder ATP macht.

Die Bildung von ATP durch die Übertragung einer Phosphatgruppe von einer energiereichen chemischen Verbindung auf ADP spielt nicht nur bei der Muskelarbeit eine entscheidende Rolle. Sie ist eine der beiden grundsätzlichen Möglichkeiten für die Zelle, Energie zu speichern. Im anderen Fall legt die Zelle außerhalb ihrer Membran einen Ionenvorrat an, den sie bei Bedarf einströmen lässt; auch dabei entsteht Energie, die sie ebenfalls zur Produktion von ATP nutzen kann.

Das wichtige physiologische Konzept der Phosphatgruppenübertragung kommt auch beim Abbau von Zuckern wie Glucose zum Einsatz. Den mehrstufigen Abbau von Glucose, für den die Zelle keinen Sauerstoff benötigt, bezeichnen Biochemiker als Glykolyse.

Nachdem Otto Meyerhof und Karl Lohmann 1930 in das frisch gegründete Kaiser-Wilhelm-Institut für medizinische Forschung nach Heidelberg umgesiedelt waren, widmeten sie einen Großteil ihrer Arbeit der Aufklärung dieses Prozesses. Die beiden Wissenschaftler entdeckten sechs der 15 Enzyme, die in dieser Reaktionsfolge Moleküle ineinander umwandeln, und identifizierten etwa ein Drittel aller Zwischenprodukte.

Abseits von Heidelberg trugen zwei weitere Forscher maßgeblich zur Aufklärung der Glykolyse bei: Gustav Emden an der Frankfurter Goethe-Universität und Jakub Parnas im polnischen Lvov. Aus diesem Grund trägt der Stoffwechselprozess den Beinamen „Emden-Meyerhof-Parnas-Weg". Dessen Endprodukt – das Pyruvat – kann die Zelle vielfältig verwenden; unter anderem dient es als Ausgangsstoff für die Bildung von Milchsäure. Somit hatte die Glykolyse Meyerhof zur Ursprungsfrage seiner physiologischen Untersuchungen zurückgeführt.

Die fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Lohmann und Meyerhof fand durch die geänderten politischen Verhältnisse in Nazideutschland ein jähes Ende. Am 16. November 1935 erhielt Meyerhof ein Schreiben des badischen Kulturministers, in dem er lesen musste: „Auf Ihren persönlichen Brief vom 15. des Monats möchte ich Ihnen mitteilen, daß die Frage der Aufrechterhaltung Ihrer Honorarprofessur ja inzwischen durch die Ausführungsverordnung vom gestrigen Tage negativ entschieden ist."

Obwohl sich Meyerhofs Stand in Heidelberg durch den Entzug seiner Lehrerlaubnis rapide verschlechterte, blieb er weitere zweieinhalb Jahre an seinem Institut. Als 1938 immer noch keine Besserung in Sicht war, floh er mit Frau und Sohn zunächst in die Schweiz. Über Frankreich und Spanien gelangte die Familie schließlich in die USA, wo Meyerhof in Philadelphia eine Professur erhielt. Hier starb er 1951 im Alter von 67 Jahren an einem Herzinfarkt.

Nachdem Meyerhofs Wirken in Deutschland lange Zeit im Schatten seines Freundes und alten Lehrers Otto Warburg stand, erfuhr der Biochemiker im Jahr 2001 eine neue Würdigung: Die Universität Heidelberg gründete in seinem Andenken das Otto-Meyerhof-Zentrum für ambulante Medizin und klinische Forschung.

Karl Lohmann erhielt 1937 einen Ruf an die Berliner Humboldt-Universität, wo er 14 Jahre lang das physiologisch-chemische Institut leitete. 1952 wechselte er an das Institut für Biochemie am Medizinisch-Biologischen Forschungszentrum der Deutschen Akademie der Wissenschaften. Hier arbeitete er auch noch über seine „Entpflichtung" im Jahr 1964 hinaus. In Berlin standen ihm im Bereich der Forschung deutlich weniger Möglichkeiten zur Verfügung als in Heidelberg, und er engagierte sich vermehrt für die Lehre. Über Jahrzehnte hinweg repräsentierte der zeitlebens unpolitische Karl Lohmann den Vorzeige-Biochemiker der DDR. Am 22. April 1978 starb der Mann, der das „energetische Kleingeld der Zelle" entdeckt, sich aber trotzdem stets in Zurückhaltung geübt hat.

Grafik: designergold

Phosphatgruppen

Ribose

Adenin

ATP – das Molekül, das die Energetik des Lebens in drei Buchstaben zusammenfasst, besteht aus Adenin, Ribose und drei Phosphatgruppen. Beim Abspalten einer Phosphatgruppe wird Energie frei, welche die Zelle vielfältig nutzt.

ter nach Göttingen. Hier promovierte er 1923 mit einer Arbeit über Montanharze. Schon während des Studiums hatte er sich für physiologische Fragestellungen begeistert, denen er sich nach der Promotion zuwandte. Bevor sich Lohmann Meyerhofs Arbeitskreis anschloss, hatte er als Praktikant im Göttinger Pharmakologischen Institut zwei Arbeiten über den Zustand des Cholesterins im Blutserum sowie eine Methode zur Serum-Cholesterinbestimmung veröffentlicht.

Karl Lohmanns praktisches Geschick erwies sich als hervorragende Ergänzung zu der eher theoretischen Begabung Meyerhofs, der sich nebenbei weiterhin seinen philosophischen Interessen widmete und jahrelang Mitherausgeber der Reihe Abhandlungen der Friesschen Schule war.

Die beiden Wissenschaftler erkannten, dass die Abspaltung eines Phosphatrests aus dem ATP-Molekül den Muskelschlag ermöglicht. Bei dieser Reaktion entsteht ziemlich genau dieselbe Menge

Der Tagesspiegel vom 11. April 1998



Es ist sicher nicht übertrieben, das ATP neben die DNA, das Molekül, das unsere Erbinformation trägt, zu stellen. Das eine [Molekül] faßt die Energetik des Lebens, das andere seine Genetik in drei Buchstaben zusammen – drei Buchstaben, hinter denen sich außer komplizierter Chemie nicht weniger als Bausteine unseres auf Physik und Chemie reduzierten mechanistischen Weltbildes verbergen.«

an freier Energie wie auch beim Kreatinphosphat, wenn dieses eine Phosphatgruppe entlässt; hiervon enthalten Muskeln etwa fünfmal mehr als ATP. Meyerhof und Lohmann schlossen aus diesen Beobachtungen, dass Kreatinphosphat als mittelfristiger Energiespeicher im Muskel wirkt. Denn wenn das ATP bei der Muskelkontraktion eine Phosphatgruppe abspaltet, kann das Kreatinphosphat diesen Verlust ausgleichen, indem es seinerseits eine Phosphatgruppe auf das Adenosindiphosphat (ADP) überträgt und daraus wieder ATP macht.

Die Bildung von ATP durch die Übertragung einer Phosphatgruppe von einer energiereichen chemischen Verbindung auf ADP spielt nicht nur bei der Muskelarbeit eine entscheidende Rolle. Sie ist eine der beiden grundsätzlichen Möglichkeiten für die Zelle, Energie zu speichern. Im anderen Fall legt die Zelle außerhalb ihrer Membran einen Ionenvorrat an, den sie bei Bedarf einströmen lässt; auch dabei entsteht Energie, die sie ebenfalls zur Produktion von ATP nutzen kann.

Das wichtige physiologische Konzept der Phosphatgruppenübertragung kommt auch beim Abbau von Zuckern wie Glucose zum Einsatz. Den mehrstufigen Abbau von Glucose, für den die Zelle keinen Sauerstoff benötigt, bezeichnen Biochemiker als Glykolyse.

Nachdem Otto Meyerhof und Karl Lohmann 1930 in das frisch gegründete Kaiser-Wilhelm-Institut für medizinische Forschung nach Heidelberg umgesiedelt waren, widmeten sie einen Großteil ihrer Arbeit der Aufklärung dieses Prozesses. Die beiden Wissenschaftler entdeckten sechs der 15 Enzyme, die in dieser Reaktionsfolge Moleküle ineinander umwandeln, und identifizierten etwa ein Drittel aller Zwischenprodukte.

Abseits von Heidelberg trugen zwei weitere Forscher maßgeblich zur Aufklärung der Glykolyse bei: Gustav Emden an der Frankfurter Goethe-Universität und Jakub Parnas im polnischen Lvov. Aus diesem Grund trägt der Stoffwechselprozess den Beinamen „Emden-Meyerhof-Parnas-Weg“. Dessen Endprodukt – das Pyruvat – kann die Zelle vielfältig verwenden; unter anderem dient es als Ausgangsstoff für die Bildung von Milchsäure. Somit hatte die Glykolyse Meyerhof zur Ursprungsfrage seiner physiologischen Untersuchungen zurückgeführt.

Die fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Lohmann und Meyerhof fand durch die geänderten politischen Verhältnisse in Nazideutschland ein jähes Ende. Am 16. November 1935 erhielt Meyerhof ein Schreiben des badischen Kulturministers, in dem er lesen musste: „Auf Ihren persönlichen Brief vom 15. des Monats möchte ich Ihnen mitteilen, daß die Frage der Aufrechterhaltung Ihrer Honorarprofessur ja inzwischen durch die Ausführungsverordnung vom gestrigen Tage negativ entschieden ist.“

Obwohl sich Meyerhofs Stand in Heidelberg durch den Entzug seiner Lehrerlaubnis rapide verschlechterte, blieb er weitere zweieinhalb Jahre an seinem Institut. Als 1938 immer noch keine Besserung in Sicht war, floh er mit Frau und Sohn zunächst in die Schweiz. Über Frankreich und Spanien gelangte die Familie schließlich in die USA, wo Meyerhof in Philadelphia eine Professur erhielt. Hier starb er 1951 im Alter von 67 Jahren an einem Herzinfarkt.

Nachdem Meyerhofs Wirken in Deutschland lange Zeit im Schatten seines Freundes und alten Lehrers Otto Warburg stand, erfuhr der Biochemiker im Jahr 2001 eine neue Würdigung: Die Universität Heidelberg gründete in seinem Andenken das Otto-Meyerhof-Zentrum für ambulante Medizin und klinische Forschung.

Karl Lohmann erhielt 1937 einen Ruf an die Berliner Humboldt-Universität, wo er 14 Jahre lang das physiologisch-chemische Institut leitete. 1952 wechselte er an das Institut für Biochemie am Medizinisch-Biologischen Forschungszentrum der Deutschen Akademie der Wissenschaften. Hier arbeitete er auch noch über seine „Entpflichtung“ im Jahr 1964 hinaus. In Berlin standen ihm im Bereich der Forschung deutlich weniger Möglichkeiten zur Verfügung als in Heidelberg, und er engagierte sich vermehrt für die Lehre. Über Jahrzehnte hinweg repräsentierte der zeitlebens unpolitische Karl Lohmann den Vorzeige-Biochemiker der DDR. Am 22. April 1978 starb der Mann, der das „energetische Kleingeld der Zelle“ entdeckt, sich aber trotzdem stets in Zurückhaltung geübt hat.

Grafik: designergold



Das Phlogiston in der Leptogenese

Alexander Unzicker, **Auf dem Holzweg durchs Universum**, Warum sich die Physik verlaufen hat

304 Seiten, Carl Hanser Verlag, München 2012, 19,90 Euro

Ohne Phlogiston kein Feuer; die geheimnisvolle Substanz wird zunächst durch Erwärmung zugeführt und entweicht dann mit den Flammen. Das Polywasser unterscheidet sich vom normalen Wasser durch eine erhöhte Viskosität. Und der Äther erfüllt den Raum und dient Licht als Medium, um sich auszubreiten. Dreimal interessante Physik – dreimal völlig falsch! Heute mögen wir darüber schmunzeln, aber diese und andere wissenschaftliche Irrtümer hielten sich zum Teil äußerst hartnäckig. Der im ausgehenden 17. Jahrhundert postulierte Äther etwa wurde erst 1887 durch das berühmte Michelson-Morley-Experiment widerlegt.

Mit solchen „Spekulationsblasen" beschäftigt sich Alexander Unzicker auch in seinem zweiten Buch. Im ersten hatte er unter dem provokanten Titel *Vom Urknall zum Durchknall* der modernen Kosmologie ordentlich die Leviten gelesen. Auch dieses Mal geht er mit Phänomenen wie Dunkle Materie und Dunkle Energie hart ins Gericht, spannt den Bogen jedoch weiter und dehnt seine Kritik auf die gesamte Physik aus. Und die wird bestimmt von Dingen wie der Stringtheorie, der Schleifenquantengravitation oder von Mutmaßungen über ein Multiversum. Unzicker hat zwar eine „tiefe Liebe zur Physik", sieht diese Beziehung derzeit aber als schwierig an: „Ich bin fassungslos, wie viele Spekulationen mit sinnlosen Rechnungen die Physik überschwemmen", schreibt der Autor im Prolog des Buchs.

Alexander Unzicker, laut Klappentext ist er Physiker, Jurist und promovierter Hirnforscher, setzt beim modernen Wissenschaftsbetrieb an, in dem das Motto gilt *Publish or perish* („Veröffentliche oder gehe unter"). So erscheint die angesehene Zeitschrift Physical Review D vierzehntäglich mit jeweils mehr als tausend Seiten. Um sich auf dem Laufenden zu halten, „könnten Sie 16 Stunden am Tag nichts anderes mehr tun, als diese neuesten Ergebnisse zu studieren". Dabei müsste man über eine außergewöhnliche Auffassungsgabe verfügen, die es erlaubt, in einer Viertelstunde die durchschnittlich 20 Formeln pro Seite nachzuvollziehen. Unzicker: „Zeit für eigenes Denken ist dabei nicht eingerechnet."

Das aber sei symptomatisch in der modernen Physik: Ihr fehle es an Einfachheit, an schlüssigen Erklärungen. Und Außenseiter, welche die von der wissenschaftlichen Gemeinde akzeptierten Standardmodelle hinterfragen, hätten praktisch keine Chance. Diese Beobachtung ist richtig, nur: Es gibt jede Menge selbst ernannte Querdenker, die unglaublichen Humbug verzapfen. Was der Physik wirklich fehlt, ist ein zweiter Einstein, der ihre tragenden Säulen – die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie – zusammenbringt. Dort anzusetzen und das große Ganze im Blick zu haben hält Unzicker für deutlich sinnvoller als Aufsätze mit Titeln wie „Leptogenese in B-L geeichter Supersymmetrie mit dem minimal-supersymmetrischen Standard-Modell-Higgs-Sektor". Dabei übersieht er, dass die Wissenschaft kleinteiliger geworden und der Erkenntnisprozess das Ergebnis vieler Mosaiksteinchen ist.

Apropos Higgs: Im vergangenen Sommer vermeldeten Forscher die vermeintliche Entdeckung dieses für die Theorie so wichtigen Teilchens. Unzicker hatte vor ein paar Jahren darauf gewettet, dass es nicht existiert. Und so passt ihm der Fund gar nicht in den Kram – und er antwortet mit einem Pauschalangriff auf das CERN: An dem europäischen Beschleuniger erreiche die Datenmenge unvorstellbare Dimensionen. Daher würden 99,9 Prozent der Daten sofort aussortiert und nur jene verwendet, die Interessantes versprechen. Aber trotz dieses Triggern genannten Prozesses: „Pro Jahr bleiben damit immer noch so viele Bytes übrig, dass sie, auf DVDs gepresst, einen Turm in Höhe des Mont Blanc ergäben – ohne Hülle. Kann man dieses Datengebirge je sinnvoll analysieren?"

Solche kritischen Anmerkungen, eloquent vorgetragen und offenbar intensiv recherchiert, finden sich in den sieben Kapiteln des Buchs zuhauf. In bisweilen atemlosem Tempo führt der Autor durch den Mikro- und den Makrokosmos, gewährt Einblicke in Methoden und Ergebnisse der heutigen Physik. Und rüttelt am Ende sogar am Allerheiligsten – an dem einen oder anderen Naturgesetz.

Alexander Unzicker fordert für die Forscher mehr Zeit zum Reflektieren, hält jede zielorientierte Finanzierung der Theoretischen Physik für kontraproduktiv und macht sich stark für eine Neuausrichtung der Experimentalphysik im Sinne nachhaltiger Wissenschaft durch „gläserne Experimente". Fazit: Über diese Thesen lässt sich trefflich streiten. Das Buch mag hie und da sogar zum Nachdenken anregen. Die Physik aber wird die wüsten Angriffe Unzickers unbeschadet überstehen. Helmut Hornung



Schmetterling statt Fruchtfliege

Beatrice Dernbach (Hrsg.), **Vom Elfenbeinturm ins Rampenlicht**, Prominente Wissenschaftler in populären Massenmedien

280 Seiten, Springer VS-Verlag, Wiesbaden 2012, 24,95 Euro

Ist es in der Wissenschaft immer noch verpönt, sich in populären Medien zu äußern? Wirken sich Auftritte in Medien positiv auf die Anwerbung von Drittmitteln aus? Kommen Wissenschaftler in Medien, indem sie selber Themen anbieten? Wie ergab sich der erste Kontakt mit Medien? Diese und ähnliche Fragen behandelt Beatrice Dernbach, Journalismus-Professorin an der Hochschule Bremen, in 13 Interviews mit Wissenschaftlern, die allesamt Erfahrungen mit Rundfunk, Fernsehen und Zeitungen haben. Die Interviews sind gemeinsam mit dem damaligen Studenten Christian Läßig geführt und vorbereitet worden, der sie für eine Abschlussarbeit ausgewertet hat.

Das Spektrum der Auswahl ist recht groß: Es reicht vom Kriminologen und Juristen Christian Pfeiffer, dem Historiker Michael Wolffsohn und dem Kriminalbiologen Mark Benecke, die alle eine kaum überschaubare Medienpräsenz zeigen oder zeigten, bis zu weniger bekannten Wissenschaftlern wie der christlichen Sozialethikerin Marianne Heimbach-Steins, die durch den Missbrauchsskandal in der katholischen Kirche zeitweise ins Licht der Öffentlichkeit rückte, und der Bionik-Professorin Antonia Kesel, die durch einzelne Projekte und eine Welle der Berichterstattung zum Thema Bionik mit Medien in Berührung kam. Als Beitrag eines Experten zum Thema Medien und Wissenschaft steht am Anfang ein Interview mit dem Bielefelder Wissenschaftsforscher Peter Weingart.

Je weiter man in dem Buch kommt, desto interessanter scheinen die Interviews zu werden: So etwa schildert der Ökonom Rudolf Hickel, wie er in der Sendung „Der heiße Stuhl“ auf RTL sich regelrecht durch die Verkabelung gefesselt vorkam und dann von vier Mitdiskutanten unisono niedergemacht wurde. Der Politologe Peter Lösche erzählt, wie er medial als Parteienforscher kategorisiert wird und aus dieser Schublade nicht mehr rauskommt; außerdem wurden er und sein Kollege Franz Walter 1992 von Fachkollegen in der Politischen Vierteljahresschrift verhöhnt, weil sie ein populärwissenschaftliches (also: lesbares) Buch über die SPD geschrieben hatten. Heute sei einer der Kritiker selbst in den Medien präsent.

Insgesamt spiegeln die Interviews eine klare Tendenz wider: In den vergangenen 20 Jahren hat es eine starke Öffnung der Wissenschaft in Richtung Medien gegeben. Für Nachwuchsforscher empfiehlt Peter Lösche die Kommunikation sogar als „Machtressource“, um unabhängiger vom Lehrherren oder der Lehrherrin zu werden. Für Peter Weingart ist die Kernfrage: Wie weit reicht der Einfluss der Medienorientierung auf die Wissenschaften selbst? Auf der Ebene der Forschungspraxis seien Veränderungen selten, aber dennoch vorhanden.

Weingart zitiert einen Biologen, der lieber an Schmetterlingen forscht als an Fruchtfliegen, weil so eine Medienpräsenz besser möglich sei. Für Weingart ist eine Medialisierung, die von den Medien selbst kommt, problematisch. Und er kritisiert auch so manches Großformat der Wissenschaftsvermittlung. Fazit: Allen, die sich für das Thema interessieren – und das sollten nicht wenige Wissenschaftler sein –, bietet das Buch eine lohnende Lektüre.

Gottfried Plehn

Weitere Empfehlungen

- Bernd-Olaf Küppers, **Die Berechenbarkeit der Welt**, Grenzfragen der exakten Wissenschaften, 194 Seiten, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2012, 32 Euro
- Dagmar Röhrlich, **Urmeer**, Die Entstehung des Lebens, 399 Seiten, mareverlag, Hamburg 2012, 28 Euro
- Joan L. Slonczewski / John W. Foster, **Mikrobiologie**, Eine Wissenschaft mit Zukunft, 1425 Seiten, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2012, 79,95 Euro

Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen
- Assoziierte Forschungseinrichtungen

Niederlande
- Nimwegen

Italien
- Rom
- Florenz

USA
- Florida

Brasilien
- Manaus

Luxemburg
- Luxemburg

SCHLESWIG-HOLSTEIN
Plön
Rostock
Greifswald
MECKLENBURG-VORPOMMERN
Hamburg
Bremen
NIEDERSACHSEN
BRANDENBURG
Berlin
Potsdam
Hannover
Magdeburg
Münster
Katlenburg-Lindau
SACHSEN-ANHALT
NORDRHEIN-WESTFALEN
Dortmund
Halle
Mülheim
Göttingen
Leipzig
Düsseldorf
SACHSEN
Köln
Dresden
Jena
Bonn
Marburg
THÜRINGEN
Bad Münstereifel
HESSEN
Bad Nauheim
RHEINLAND-PFALZ
Mainz
Frankfurt
SAARLAND
Kaiserslautern
Erlangen
Saarbrücken
Heidelberg
BAYERN
Stuttgart
Tübingen
Garching
BADEN-WÜRTTEMBERG
München
Martinsried
Freiburg
Seewiesen
Radolfzell

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Impressum

MaxPlanckForschung wird herausgegeben vom Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift
Hofgartenstraße 8, 80539 München
Tel. 089 2108-1276 (Fax: -1405)
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.mpg.de/mpforschung

Verantwortlich für den Inhalt
Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung
Peter Hergersberg (-1536), Helmut Hornung (-1404)

Redaktion
Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)



MaxPlanckForschung wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council (FSC)



Bildredaktion
Susanne Schauer (-1562)

Wissenschaftlicher Beirat
Prof. Dr. Gerhard Wegner
Prof. Dr. Heinz Wäßle
Prof. Dr. Wolfgang Prinz

Gestaltung
Julia Kessler, Sandra Ostertag
Voßstraße 9, 81543 München
Tel. 089 2781 8770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho
kaltner verlagsmedien GmbH
Dr.-Robert-Zoller-Str. 1, 86399 Bobingen

Druck & Vertrieb
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg

Anzeigenleitung
Beatrice Rieck
Vogel Druck und Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg
Telefon: +49 931 4600-2721 (Fax: -2145)
E-Mail: beatrice_rieck@vogel-druck.de

MaxPlanckForschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MaxPlanckResearch**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 82 000 Exemplare (**MaxPlanckResearch**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MaxPlanckForschung** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 81 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 21 800 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 5400 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2012 umfasst insgesamt 1,46 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

Standpunkt

überzeugend

Die auflagenstärkste hochschul- und
wissenschaftspolitische Zeitschrift Deutschlands.
Leseprobe unter: www.forschung-und-lehre.de
oder per Fax 02 28 902 66-90

